



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Dirección General de Estudios de Posgrado

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y
Geográfica

Unidad de Posgrado

**Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO
reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas
residuales mediante técnicas de electrocoagulación y
adsorción**

TESIS

Para optar el Grado Académico de Doctor en Ciencias
Ambientales

AUTOR

Martha Mirella BERMEO GARAY

ASESOR

Oscar Rafael TINOCO GÓMEZ

Lima, Perú

2017



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Bermeo, M. (2017). *Remoción eficiente de colorante refractario azul MNO reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción*. [Tesis de doctorado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Unidad de Posgrado]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

215

UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE SAN MARCOS
(Universidad del Perú, DECANA DE AMÉRICA)
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINERA, METALÚRGICA Y
GEOGRÁFICA

UNIDAD DE POSGRADO

«Año del buen servicio al ciudadano»

17(R)
154

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS

SUSTENTACIÓN PÚBLICA

En la Universidad Nacional Mayor de San Marcos – Lima, a los diecisiete días del mes de mayo del 2017, siendo las 14:00 horas, se reúnen los suscritos miembros del JURADO EXAMINADOR DE TESIS nombrado mediante Dictamen N.º 264/UPG-FIGMMG/2017 del 05 de mayo de 2017 con la finalidad de evaluar la sustentación oral de la siguiente tesis:

TÍTULO

«REMOCIÓN EFICIENTE DE COLORANTE REFRACTARIO AZUL MNO REACTIVO EN COMBINACIÓN CON VINIL SULFÓNICO EN AGUAS RESIDUALES MEDIANTE TÉCNICAS DE ELECTROCUAGULACIÓN Y ADSORCIÓN»

Que, presenta la **MG. MARTHA MIRELLA BERMEO GARAY**, para optar el **GRADO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES**.


El secretario del Jurado Examinador de la Tesis, analiza el expediente 07456-FIGMMG-2014 del 16 de octubre del 2014, en el marco legal y Estatutario de la Ley Universitaria, acreditando que tiene todos los documentos y cumplió con las etapas de la Directiva para el procedimiento de la elaboración de la tesis para la obtención del Grado de Magister o Doctor (Aprobado por Resolución Directoral 080.EPG.2010).

Luego de la Sustentación de la Tesis, los miembros del Jurado Examinador procedieron a aplicar la escala descrita en el Art. 61 del precitado Reglamento, correspondiéndole al graduando la siguiente calificación:

MUY BUENO (17)

Habiendo sido aprobada la sustentación de la tesis, el Presidente recomienda a la Facultad se le otorgue el **GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN CIENCIAS AMBIENTALES** a la **MG. MARTHA MIRELLA BERMEO GARAY**.

Siendo las 15:00 horas, se dio por concluido al acto académico.


DR. VIDAL SIXTO RAMBURÚ ROJAS
Presidente


DR. JORGE LUIS INCHE MITMA
Secretario


DR. JUAN MANUEL CEVALLOS AMPUERO
Miembro


DR. FRANCISCO JAVIER WONG CABANILLAS
Miembro


DR. OSCAR RAFAEL TINOCO GÓMEZ
Asesor

DEDICATORIA

*Dedico este trabajo a la memoria de mí
Padre, a mi madre que gracias a Dios la tengo, mi hermano. A mi esposo a
mis hijas, a Luis David y María Emilia, que siempre me han dado su apoyo
y comprensión,*

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento a la Universidad Nacional Mayor de San Marcos “Decana de América”. Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica. A su Unidad de Postgrado “Dr. Pedro Alejandro Fernández Álvarez. A la Universidad de Guayaquil, Facultad de Ingeniería Química, a los asesores: Dr. Oscar Tinoco Gómez (Temático), Dr. Jesús Chávez (Metodológico), Dr. Alfredo Rivera (Experimentación).

PRESENTACIÓN

La presente tesis trata sobre la depuración de aguas residuales con colorante refractario, utilizando técnicas de electrocoagulación y adsorción, es un aporte importante en especial a la industria textil que es generadora de grandes volúmenes de agua residual contaminada con colorantes. Por esta razón se presenta esta investigación al jurado evaluador para su consideración.

Existen distintos tratamientos para eliminación de colorantes, de los cuales se ha considerado una combinación de ellos, como es la aplicación de un proceso de oxidación avanzada con aporte de energía apoyados en diferentes configuraciones y la operación de adsorción. En la primera parte se trabaja con electrocoagulación con el empleo de electrodos de hierro, los cuales generan en el ánodo los coagulantes que desestabilizan a las partículas coloidales y en el cátodo genera hidrógeno, que ayuda a que los flóculos sean transportados hacia la parte superior del sistema. Este proceso posee una multitud de mecanismos para eliminar contaminantes, lo que hace que tengan mayor eficiencia para remover partículas indeseables, es un método simple, no requiere adición de productos químicos debido a que genera los coagulantes que desestabilizan a la partículas coloidales in situ, y posteriormente se realiza una clarificación antes de pasar al filtro de adsorción con carbón activado, para lograr con esta combinación concluir el tratamiento y mantener el absorbente por mayor tiempo sin saturarse.

ÍNDICE GENERAL

<i>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</i>	1
1.1. Situación problemática.....	1
1.2. Formulación del Problema:	3
1.2.1.Problema general.....	3
1.2.2.Problemas Específicos	4
1.3. Justificación teórica	4
1.4. Justificación práctica.....	6
1.5. Objetivos.....	7
1.5.1.Objetivo General.....	7
1.5.2.Objetivos Específicos.....	7
<i>CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO</i>	8
2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación.....	8
2.2. Antecedentes de investigación	13
2.3. Bases teóricas	15
2.3.1. Fundamentos de Electroquímica.....	15
2.3.1.1 Celdas Electroquímicas.....	16
2.3.1.2 Electrólisis	17
2.3.1.3 Reacciones Electroquímicas	18
2.3.1.4 Potenciales de Oxidación – Reducción	19
2.3.1.5 Leyes de la Electrólisis o de Faraday	20
2.3.1.6 Procesos de Oxidación Avanzada.....	22
2.3.1.7 Electrocoagulación.....	24
2.3.1.8 Electroflotación.....	34
2.3.2 Adsorción	35
2.3.3 Remoción de colorantes refractarios.....	38

2.3.3.1. Colorantes	40
2.4. Marco Conceptual	51
2.5. Marco Legal	59
2.6. Hipótesis y Variables	59
2.6.1. Hipótesis General	59
2.6.2. Hipótesis Específicas	59
2.6.3. Identificación de Variables	60
2.6.4. Operacionalización de Variables	60
<i>CAPÍTULO III: METODOLOGÍA</i>	63
3.1. Tipo y Diseño de Investigación.	63
3.2. Unidad de Análisis	66
3.3. Población de Estudio	66
3.4. Tamaño de Muestra.....	67
3.5. Selección de Muestra	67
3.6. Técnicas de Recolección de Datos.....	68
3.6.1. Proceso de experimentación	68
3.6.2. Técnica de Control de Variables	69
3.6.2. Diagramas del Experimento	70
3.7. Análisis e interpretación de la Información.	70
3.8. Materiales y Métodos	71
3.8.1 Equipos, materiales y reactivos.....	71
3.8.2 Diseño y Construcción.	79
3.8.3 Preparación de muestra sintética	87
3.9. Diseño Experimental	90
3.9.1. Procedimiento de operación de la unidad de electrocoagulación	92
3.9.2. Operación en la unidad piloto de electrocoagulación y adsorción con carbón activado.....	94

3.9.3. Procedimiento para toma de muestras.....	96
3.10. Pruebas estadísticas	99
<i>CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN</i>	<i>100</i>
4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados	100
4.1.1. Obtención de caracterización de Muestra Sintética	100
4.1.2. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.	101
4.1.3. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 3 paquetes con una separación de 0.8 cm.	104
4.1.4. Resultados y Análisis de Estadística Configuración de 4 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.	107
4.2. Presentación de Resultados.....	112
4.2.1. Comparación de los resultados de las pruebas de color y DQO para el tratamiento de electrocoagulación seguido de adsorción	112
<i>CONCLUSIONES</i>	<i>115</i>
<i>RECOMENDACIONES.....</i>	<i>117</i>
<i>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</i>	<i>118</i>
<i>ANEXOS</i>	<i>122</i>

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Clasificación de los colorantes textiles.....	45
Tabla 2. Grado de fijación para diferentes combinaciones colorante/fibra...	45
Tabla 3. Características químicas del Colorante Reactivo Azul Marino (mno)	51
Tabla 4. Operacionalización de variables	62
Tabla 5. Parámetros para caracterización de muestra sintética de efluente textil.	68
Tabla 6. Control de Constancia de Condiciones para el experimento.	69
Tabla 7. Formulación de muestra sintética	88
Tabla 8. Caracterización de muestra sintética.	100
Tabla 9. Verificación de hipótesis principal	114

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Ubicación de industrias de textiles en la ciudad de Guayaquil.	2
Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POA).	23
Figura 3. Remoción de contaminantes con electrodo de Hierro.	28
Figura 4. Remoción de contaminantes con electrodo de aluminio.....	28
Figura 5. Esquema de un proceso de electrocoagulación.	31
Figura 6. Tipos de flujo hidráulico en reactores de coagulación.	32
Figura 7. Configuraciones de celdas de electrocoagulación.	32
Figura 8. Representación de las fuerzas en un soluto	36
Figura 9. Colorantes.	42
Figura 10. Estructura molecular de Colorante Reactivo Azul.....	51
<i>Figura 11.</i> Tipo y diseño de investigación	63
Figura 12. Niveles de investigación	65
Figura 13. Diagrama de Flujo de Proceso en Lote o batch y Continuo.....	70
Figura 14. Esquema de un sistema de tratamiento de agua residual. Vista isométrica I.	71
Figura 15. Esquema de un sistema de tratamiento de agua residual. Vista isométrica II.	72
Figura 16. Sistema de tratamiento de agua residual.....	72
Figura 17. Fuente de Poder	73
Figura 18. Fuente de poder. Vista lateral.....	73
Figura 19. Fuente de poder. Perilla de regulación de amperaje.	74
Figura 20: Paquete de electrodo de hierro.....	74
Figura 21: Equipo de electrocoagulación.....	75
Figura 22: Equipo de sedimentación.....	76
Figura 23: Bomba magnética Serie 507300.....	77
Figura 24. Filtro de carbón activado marca Darco.	77
Figura 25. Filtro de carbón activado.....	78
Figura 26. Tanque de PVC de 100litros de capacidad.....	78
Figura 27. Pipeteador y pipeta para extraer muestras.	79
Figura 28.Celda de electrocoagulación.....	80
Figura 29. Colector de espuma.....	81
Figura 30. Lámina acrílica con orificios para separar lodos.	81

Figura 31: Electrodo de hierro.....	82
Figura 32. Placas plásticas de 4 mm.	82
Figura 33. Cámara de sedimentación.....	83
Figura 34. Bomba magnética.....	84
Figura 35. Esquema del sistema de Electrocoagulación armado. Vista lateral.....	85
Figura 36. Esquema del sistema de Electrocoagulación armado. Vista arriba.....	85
Figura 37. Equipos de análisis de agua residual sintética y real y sus características.....	86
Figura 38. Constituyentes de muestra sintética.	88
Figura 39. Preparación del agua residual sintética.	89
Figura 40. Muestra sintética.....	90
Figura 41. Configuración de electrodos.	91
Figura 42. Configuración del electrodo.	93
Figura 43. Regulación de Fuente de poder.....	93
Figura 44. Etapas de la Electrocoagulación.....	94
Figura 45. Cámara de electrocoagulación	95
Figura 46. Proceso de tratamiento de aguas residuales sintética textil en continuo.....	96
Figura 47. Colocación de la pipeta en el pipeteador.	97
Figura 48. Colocación de líquido en botella de muestra.	97
Figura 49. Equipo de Electrocoagulación	98
Figura 50. Muestra de corrida en línea	98
Figura 51: Muestras antes y después del tratamiento.	99
Figura 52. Estadística para 3x2, 0.8 cm en Color.	102
Figura 53. Estadística para 3x2, 0.8 cm en DQO.....	103
Figura 54. Beneficios de la comparación estadística de configuración 3x2.....	104
Figura 55. Estadística para 3x3, 0.8 cm en Color.	105
Figura 56. Estadística para 3x3, 0.8 cm en DQO.....	106
Figura 57. Estadística para 4x2, 0.8 cm en Color.	108
Figura 58. Estadística para 4x2, 0.8 cm en DQO.....	109
Figura 59. Comparativa de resultados de remoción.	111

Figura 60. Correlación lineal entre el DQO (mg/L) y el color (Pt/Co).	112
Figura 61. Comparación de la concentración de color con la prueba de electrocoagulación seguida por adsorción.....	113
Figura 62. Comparación de la concentración de DQO con la prueba de electrocoagulación seguida por adsorción.....	114

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia.....	123
Anexo 2. Tablas con datos de las corridas que fueron utilizadas en la parte estadística.....	124
Anexo 3. Probabilidad resultante de Comparación de resultados de pruebas de Color y DQO para el tratamiento de electrocoagulación seguido de adsorción.	128
Anexo 4. Fotos del proceso de electrocoagulación seguido de adsorción.	132
Anexo 5. Especificaciones del carbón activado granular utilizado.	136
Anexo 6. Técnicas de análisis para DQO y Color.	138
Anexo 7. Resultados de análisis realizados en laboratorio acreditado con la Norma 17025	143
Anexo 8. Tablas utilizadas como referencia del Acuerdo Ministerial. 097A del 4 de noviembre del 2015.....	147
Anexo 9. Cálculo del costo de tratamiento de agua residual textil aplicando electrocoagulación.....	149
Anexo 10. Cálculo del costo de tratamiento de agua residual textil aplicando electrocoagulación a nivel industrial.	152

TABLA DE NOMENCLATURA

A	Amperio
Ah	Amperio hora
Al	Aluminio
J	Densidad de corriente A/cm ²
C ₁₂ H ₁₀ N ₂	Azobenzeno
Ca ⁺²	Ión de calcio
CaCl ₂	Cloruro de calcio
CAS	Chemical Abstracts Service
CaO	Óxido de calcio
C	Coulombs o Culombio
Co	Concentración inicial de adsorbible en fase líquida,
Ce	Concentración de adsorbible en fase líquida en el equilibrio
Cl ₂	Dicloro, cloro diatómico
DBO	Demanda bioquímica de oxígeno
DQO	Demanda química de oxígeno
e ⁻	Electrones
EC	Electrocoagulación
EINECS	European Inventory of Existing Chemical
Fe	Hierro
fem	Fuerza Electromotriz
Fe(OH) ₂	Hidróxido ferroso
Fe(OH) ₃	Hidróxido férrico
Fe ₃ O ₄	Óxido ferroso férrico
H	Hidrógeno
HCO ₃ ⁻	Bocarbonato
H ₂ O ₂	Peróxido de hidrógeno
m	Metros
m ²	Metros cuadrados
m ³	Metros cúbicos
mg/l	Miligramos por litro
mg/Ah	miligramos/ Amperio horas
Mg	Magnesio

Mg ⁺²	Ión de magnesio
mS	milisiemens
mno	marino
Na	Sodio
NaCl	Cloruro de sodio
NTU	Unidades nefelométricas de turbidez
qe	Capacidad de equilibrio
O	Oxígeno
OH•	Radical hidroxilo
pH	Logaritmo negativo de la concentración de iones hidrogeno
PMMA	Polímero de Metil Metacrilato
POA	Procesos de oxidación avanzada
Pt/co	Unidades de color Platino/ cobalto
PVC	Ploricloruro de vinilo
R	Especie reducida
SO ₄ ⁼	Sulfato (con dos cargas negativas)
T	Temperatura
t	Tiempo
URSS	Unión de República Socialistas Soviéticas
UV	Ultravioleta
v	Voltios
V	Volumen de disolución
W	Masa de adsorbente
Zn	Zinc, Cinc
ηe^-	el número de electrones transferidos por mol
$\Delta \epsilon$	Delta de ϵ (Diferencia del potencial entre los electrodos)
ϵ^0	Diferencia de potencial

RESUMEN

La presente tesis doctoral se basó en el estudio de la eliminación de color de efluente textil, con grupo reactivo vinil sulfónico que es utilizado en la tintura de algodón y otras fibras celulósicas, el cual es poco biodegradable, la industria textil consume grandes volúmenes de agua para sus procesos como: preparación, tintura y acabado, sus efluentes están constituidos por impurezas de los textiles, reactivos, compuestos auxiliares y colorantes, presentando las siguientes características: pH 8.93, color 3500 unidades Pt/Co, Demanda Química de Oxígeno (DQO) de 1300 mg/l, Demanda Bioquímica de Oxígeno (DBO) 177 mg/l, turbiedad 137 NTU, entre otros; los que interfieren en el paso de la luz solar provocando un desequilibrio en los ecosistemas acuáticos. Existen algunos compuestos refractarios difíciles de eliminar con tratamientos convencionales como los colorantes. Por lo que se aplicó un tratamiento específico la electrocoagulación, se emplearon electrodos de hierro con diversas configuraciones de celdas y paquetes a diferentes amperajes, voltajes y tiempo de reacción. Los parámetros de respuesta fueron el porcentaje de remoción de color y la Demanda Química de Oxígeno, con toma de muestras por triplicado, se hicieron pruebas en lote, cuyas variables de operación sirvieron para trabajar en continuo, posteriormente se usó un sistema de adsorción con carbón activado, aunque de acuerdo a los resultados no era necesario aplicarlo. Se obtuvo 31mg/l de Demanda Química de Oxígeno que equivale a una remoción del 97,54% y 32 unidades de Color que equivale al 99,11% de remoción, en el proceso de electrocoagulación y en el de adsorción se consiguió una remoción de 97,95% para Demanda Química de Oxígeno y 99,20% para Color. Lo que facilita su reutilización o descarga.

Palabra clave: Electrocoagulación, adsorción, colorante refractario, agua residual textil

ABSTRACT

The present thesis was based on the study of the color removal of textile effluent, with reactive vinyl sulfonic group that is used in the dyeing of cotton and other cellulosic fibers, which is little biodegradable, the textile industry consumes large volumes of water. For its processes such as: preparation, dyeing and finishing, its effluents are constituted by impurities of textiles, reagents, auxiliaries and dyes, having the following characteristics: pH 8.93, color 3500 units Pt/Co, Chemical Oxygen Demand (COD) Of 1300 mg/l, Biochemical Oxygen Demand (BOD) 177 mg/l, turbidity 137 NTU, among others; Which interfere in the passage of sunlight causing an imbalance in aquatic ecosystems. There are some refractory compounds difficult to remove with conventional treatments such as dyes. As a specific treatment electrocoagulation was applied, iron electrodes with different configurations of cells and packages were used at different amperages, voltages and reaction time. The response parameters were the percentage of color removal and the Chemical Oxygen Demand, with sampling in triplicate, batch tests were carried out, whose operating variables were used to work in continuous, afterwards an adsorption system was used with Activated carbon, although according to the results it was not necessary to apply it. It was obtained 31 mg/l of Chemical Oxygen Demand that equates to a removal of 97.54% and 32 units of Color that equals 99.11% of removal, in the process of electrocoagulation and in the adsorption process was obtained a removal of 97.95% for Chemical Oxygen Demand and 99.20% for Color. This facilitates its reuse or discharge.

Keyword: Electrocoagulation, adsorption, refractory dye, textile waste water

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Situación problemática

La investigación se realizó en la ciudad de Guayaquil, ciudad con mayor densidad poblacional del Ecuador, la segunda en el litoral. Guayaquil está ubicada entre el río Guayas y el estero Salado. Coordenadas geográficas Latitud: -2º 10' S; Longitud: 79º 54' O. Específicamente en la Universidad de Guayaquil. Facultad de Ingeniería Química.

La industria textil se ha convertido en un puntal muy importante en el desarrollo del Ecuador. Pero al mismo tiempo es una de las mayores consumidoras de agua para sus procesos, ocasionando la generación de alta carga contaminante que, al no recibir el tratamiento adecuado, constituye un problema ambiental.

Existen alrededor 9 industrias textiles y aproximadamente 600 empresas afines.

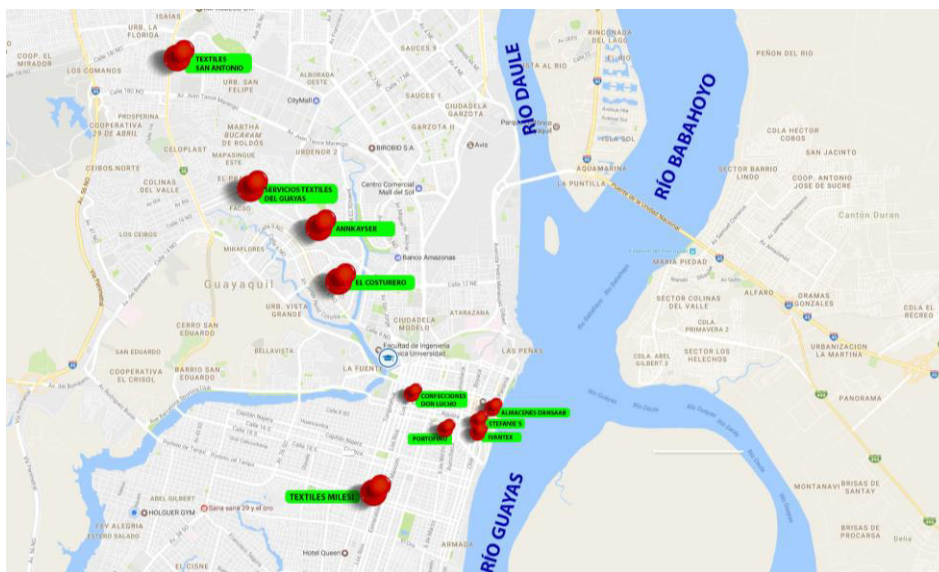


Figura 1. Ubicación de industrias de textiles en la ciudad de Guayaquil.
Fuente. Elaboración propia

En la Figura 1, se puede observar la ubicación de algunas industrias textiles, que se encuentran ubicadas en la ciudad de Guayaquil. Como se puede apreciar, en su mayoría descargan sus aguas residuales a los cuerpos hídricos (esteros).

Dentro de los contaminantes del agua residual de la industria textil se encuentran los contaminantes orgánicos refractarios, compuestos de alta toxicidad entre los que se encuentran: fenoles, metales y colorantes, entre los que está el colorante refractario azul marino (mno), reactivo en combinación con vinil sulfónico, sustancias que ejercen una influencia desfavorable sobre el balance de oxígeno y que son computables mediante parámetros como DBO y DQO. Los mismos que pueden ser removidos mediante las técnicas de electrocoagulación y adsorción con carbón activado, entre otros, siendo económicamente y tecnológicamente viables pues, no se requiere añadir un reactivo coagulante disminuyendo la formación de lodos y luego el carbón activado actúa dando el acabado final al agua tratada.

De acuerdo a la clasificación industrial, creada por la Corporación para la Investigación Socioeconómica y Tecnológica de Colombia (CINSET), se cataloga a los efluentes del sector textil como de alto impacto ambiental y lo

define como de "Alta Significación Ambiental ASA", siendo el impacto más negativo en los efluentes líquidos (DAMA, 1990).

En la actualidad la mayor parte de las plantas de tratamiento de aguas residuales de la industria textil utilizan tecnologías convencionales, que no son suficientes para cumplir con las normativas vigentes para su descarga ya sea a cuerpos hídricos o sistema de alcantarillado. Por lo que se hace necesario implementar tecnologías alternativas, como electrocoagulación y adsorción.

Se debe destacar que existen métodos para eliminar materia orgánica de efluentes acuosos, que se valen de agentes oxidantes para la degradación, materiales adsorbentes y otros utilizan la degradación biológica. Estos métodos presentan diferentes características que determinan su conveniencia en el tratamiento de efluentes líquidos (Arango, 2007). En esta investigación se propone utilizar el método de electrocoagulación en la fase primaria, el cual no genera nuevos contaminantes, en combinación de un material adsorbente tradicional en la fase terciaria. Mediante esta investigación se plantea una alternativa de tratamiento de los compuestos refractarios de las aguas residuales generadas por la industria textil para lo cual, se aplica electrocoagulación y proceso de adsorción con carbón activado.

1.2. Formulación del Problema:

Por cuestiones metodológicas de delimitación y priorización de la problemática en estudio, la investigación se concentra en el siguiente problema general:

1.2.1. Problema general

¿Mediante las técnicas de electrocoagulación y adsorción con carbón activado se puede remover eficientemente colorante refractario azul mno reactivo en combinación con vinil sulfónico, de agua residual de la industria textil?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos del agua residual sintética de la industria textil que alteran la calidad del agua de cuerpos hídricos?
- ¿Al aplicar técnicas de electrocoagulación los niveles de remoción de los colorantes refractarios y la demanda química se incrementan en el agua residual de industria textil?
- ¿Cómo la aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de la electrocoagulación, permite obtener efluentes con parámetros de calidad para su reutilización o descarga?

1.3. Justificación teórica

Esta investigación propone estrategias que al aplicarse contribuirán a la depuración de los efluentes líquidos de la industria textil de la ciudad de Guayaquil. Así mismo permite la aplicación de tecnologías combinadas como electrocoagulación y adsorción. Un factor importante de esta investigación es evaluar la posibilidad de eliminar otros contaminantes existentes en esas aguas residuales, distintos de la materia coloidal. Esta propuesta permite llevar a cabo tratamiento de aguas residuales sin necesidad de reactivos, usando cargas eléctricas que desestabilizan las partículas coloidales facilitando así su precipitación.

Álvarez, (1999), en su artículo derivado de la investigación "Evaluación de la electrocoagulación para el tratamiento de aguas residuales coloreadas", menciona que gran número de empresas alrededor del mundo descargan sus aguas residuales a los cuerpos de agua sin ningún tratamiento o con tratamientos inadecuados, acción que obedece a problemas económicos, falta de responsabilidad ambiental o por falencias en los sistemas legislativos ambientales, y que genera daños e impactos ambientales.

Los colorantes, en especial los de origen sintético que se encuentran presentes en las aguas residuales, son responsables de muchos de los efectos nocivos para el medio ambiente, la flora y la fauna acuática. Entre los efectos más significativos se encuentra la disminución del oxígeno disuelto,

la eutrofización, la formación de compuestos recalcitrantes y tóxicos para las células y la obstaculización del paso de la luz a los cuerpos de agua y su deterioro estético (Álvarez, 1999).

Parte de la importancia de esta investigación radica en la conveniencia de la industria en la implementación de cambios en los procesos y la aplicación de tecnologías avanzadas, con el fin de lograr disminuir el grado de contaminación de los cuerpos hídricos, mediante una mejor gestión de los sistemas de control de contaminación. Todo esto se traduce en la reducción del consumo de agua de proceso, al poder reusar las aguas residuales y por ende resulta en una disminución del impacto ambiental, beneficiando a la sociedad.

En pruebas iniciales se consideró la idea de utilizar agua residual textil real, no logrando tener muestras homogéneas por lo que se optó por muestras sintéticas para las experimentaciones. Se trabajó con este tipo de agua con el fin de mantener una muestra homogénea en todas las experimentaciones ya que el agua va cambiando de acuerdo a la planificación del color en el teñido de la fibra en las plantas de producción.

Los efluentes de las agua residuales de textiles presentan una serie de contaminantes, debido a lo cual se ha delimitado al estudio del componente colorante refractario por ser el nocivo, siendo el de mayor incidencia en la contaminación, el que al removerlo también permite disminuir otros parámetros como la demanda química de oxígeno, dada la complejidad de este contaminante se hizo una investigación más profunda.

Las técnicas que se proponen son importantes para resolver un problema real, previendo las consecuencias que enfrentará la industria textil de no llevar a cabo procedimientos que logren cumplir con los máximos permisibles para descargas de contaminantes en cuerpos de agua. Así, mismo también tiene una utilidad metodológica, por la implementación de técnicas de electrocoagulación y adsorción con una o más modificaciones de las variables de operación como intensidad de corriente, tiempo entre otros.

1.4. Justificación práctica

Esta investigación contribuye a disminuir el impacto ambiental negativo en los efluentes líquidos, producto de la industria textil, disminuyendo los riesgos de contaminación a que puede estar expuesta la comunidad.

Se destaca que los contaminantes que se encuentran en los efluentes de la industria textil son considerados persistentes por no ser removidos con los métodos convencionales de tratamiento de aguas, debido a que presentan estructuras complejas y a su origen sintético. Otro justificativo práctico es la gran cantidad de colorante que queda en las aguas residuales. Esto se debe al hecho que los compuestos colorantes son aprovechados en el proceso de teñido generalmente hasta el 50% dependiendo de su tipo, por lo que el resto es eliminado en las aguas residuales (Cortazar Martínez, y otros, 2012).

Adicionalmente el sector industrial textil se ve beneficiado con esta investigación al implementar los cambios en los procesos de manejo de aguas residuales, mediante la aplicación de tecnologías avanzadas que logran disminuir el grado de contaminación de los cuerpos hídricos, por medio, de la mejora de la gestión de los sistemas de control de contaminación. Esta propuesta va encaminada a reducir el consumo de agua de proceso, la reutilización de aguas residuales lo que se traduce en una disminución de los costos de operación, y en el cumplimiento de los máximos permisibles para descargas de los efluentes.

En el Art. 86 de la Constitución Política de la República del Ecuador declara de interés público a la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y el patrimonio genético del país, a la recuperación de espacios naturales degradados, al establecimiento de un Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas que garanticen la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecológicos.

Desde el punto de vista técnico, el trabajo aporta evidencia de la factibilidad de un método alternativo, el de electrocoagulación para el tratamiento de efluentes textiles.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo General

Establecer el nivel de eficiencia de la remoción del colorante refractario mno reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación, seguida de adsorción.

1.5.2. Objetivos Específicos

- Caracterizar las propiedades físicas químicas del efluente sintético de industria textil que alteran la calidad del agua de cuerpos hídricos.
- Determinar en qué medida la aplicación de la técnicas de electrocoagulación incrementan los niveles de remoción de los colorantes refractarios y la demanda química de oxígeno en la industria textil.
- Determinar en qué medida la aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de la electrocoagulación, permite obtener efluentes con parámetros de calidad para su reutilización o descarga.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO

2.1. Marco filosófico o epistemológico de la investigación

En los Principios Epistemológicos del Problema Ambiental, "Lo ambiental" supone una profundidad y sistemática discusión respecto al sentido de la cultura en diversas manifestaciones históricas: la tecnología, las ciencias el arte, los mitos y religiones, y la vida diaria que causan acciones devastadoras de los seres humanos sobre el entorno biótico y abiótico (Amezquita, 2013).

El pensamiento ambiental complejo es un movimiento intelectual que surge como respuesta a la necesidad de enfrentar las crisis ambientales derivadas del agotamiento del paradigma tecnológico industrial y postindustrial en el pasado siglo XX, que amenaza con la destrucción del medio ambiente. Este pensamiento propone para su estudio y comprensión la instauración de una "episteme" y de una praxis que abra a los estudiosos de la problemática ambiental posibilidades epistemológicas, fundamentadas en la comprensión, en la diferencia y especificidad y en la alteridad e intervención de las relaciones "ecosistemas – cultura", y en la biodiversidad (Amezquita, 2013).

La electroquímica ambiental es una aplicación emergente de la ingeniería química del cual es una disciplina científica y tecnológica que tiene como objetivo de estudio el diseño y la operación de los equipos y procesos en los que se produce interconversión entre energía química y eléctrica. A nivel histórico se puede afirmar que surgió en la segunda mitad del siglo XX como una nueva rama de la Ingeniería Química, pudiendo considerarse como el resultado de la interacción de la Ingeniería Química con la Electroquímica y con la Ciencia de los Materiales (Barrera, 2014, pág. 3).

Transformación de la Electrocoagulación a través del tiempo

Desde el siglo XIX, en 1888, se efectuó el primer ensayo reportado en Londres por Webster, este proceso utilizaba ánodos de hierro soluble, proceso que fue investigado luego en otras localidades de Inglaterra. La caída de potencial entre los electrodos distantes una pulgada entre sí fue de 1,8 vatios y la corriente anódica de 0,6 Amp/pie². Cinco años más tarde, Wolff electrolizó una solución concentrada de sal para producir cloro y soda cáustica que utilizaba para esterilizar aguas negras en Brewster, NY.

En 1896 se usó en Louisville, Kentucky, una modificación del proceso de Webster para coagular agua cenagosa del río Ohio, proceso en el que se utilizó ánodos de hierro y aluminio, los cuales fueron efectivos en coagular el agua, pero sin una reducción importante en el oxígeno consumido. (Arango Ruíz Á. , 2005)

Luego en el año 1906 se concibe la primera patente concedida en Estados Unidos, pero con el tiempo se presentaron problemas de tipo financiero o de regulación de incentivos para que la industria adoptara esta técnica.

Por otro parte Webster en 1908 el proceso se utilizó en Santa Mónica con reducciones de 40% de materia orgánica. Bull en 1911 electrolizó una salmuera con ánodo de grafito interponiendo una membrana de asbesto entre los electrodos. Una modificación del proceso Webster -llamado Landreth- se utilizó en 1914 en Nueva York, en éste se añade cal para mejorar la conductividad del electrolito (Arango Ruíz Á. , 2005).

En 1930 este proceso dejó de tener interés para la industria aunque como hecho aislado fue utilizado en 1932, en Alemania, con eficiencia del 50% en reducción de la DBO de aguas residuales. La falla de estos procesos se debió al alto costo de energía y a la necesidad de recambiar los electrodos. En 1947, en URSS, se utilizó el proceso con electrodos de hierro, obteniendo remociones de 70-80% de DBO. Unos años más tarde, en 1958, el profesor Mendía, de la Universidad de Nápoles, utilizó esta técnica para desinfectar las aguas negras de ciudades costeras. En este proceso se mezcló 25-30% en volumen de agua de mar antes de la electrólisis (Arango Ruíz Á. , 2005).

En Noruega se combinaba 20% de agua de mar con las aguas residuales en la electrólisis para la remoción de fosfato utilizando electrodos de carbón. Aunque la eficiencia del proceso fue buena hubo problemas de corrosión.

Se han reportado trabajos en URSS en donde se utilizó el proceso para remover partículas dispersas de aceite, grasa y petróleo. En 1971, en Vancouver del Norte, se utilizaron ánodos de aluminio para disolverlos y coagular aguas negras. Este proceso operó a un costo ligeramente inferior al requerido con alumbre (Arango Ruíz Á. , 2005).

Variación de la Adsorción en el tiempo

Las primeras observaciones de tipo cuantitativo en el campo de la adsorción fueron realizadas por Carl Wilhelm Scheele en 1773 y por Fontana en 1777, quienes en sus respectivas publicaciones dan cuenta de algunos experimentos de adsorción de gases por carbón vegetal y por materiales arcillosos de origen diverso. Y en 1786, otra de Lowitz, en la que expone los resultados obtenidos al decolorar disoluciones de ácido tartárico con carbón vegetal. Este adsorbente se continuó utilizando profusamente hasta que en 1811 Figuier descubrió que el carbón de huesos era un decolorante más eficaz que el carbón vegetal. Con el transcurso de los años, y el desarrollo de la industria, aumentó el uso del carbón (especialmente carbón de huesos y carbón de sangre) y se introdujeron otros adsorbentes tales como tierra de batán, tierra de diatomeas (diatomita o kieselgur), gel de sílice, arcillas activadas, alúmina activada y carbones activos, de los que, probablemente, son estos últimos los más versátiles y empleados en la actualidad (Valenzuela Calahorro, 2005).

El término “adsorción”, propuesto por BoisReymond, llega a la bibliografía en 1881 de la mano de Kayser. En esta época aparecen también los términos “isoterma” y “curva isoterma”, para definir los resultados de las medidas de adsorción a temperatura constante. En 1909 McBain introduce el término “absorción” para describir lo observado al estudiar la adsorción de hidrógeno por carbón. Este mismo investigador propuso el término “sorción” para incluir la adsorción y la absorción, procesos que en muchos casos no se pueden

diferenciar de manera precisa. Por esto mismo, en casos dudosos se suelen utilizar los términos “sorción”, “sorbible”, “sorbente” y “sorbido” (Valenzuela Calahorro, 2005).

En 1901, Von Ostreyko sienta las bases para la preparación industrial de carbones activados, tanto por activación directa durante la carbonización, con cloruros metálicos, como activando con dióxido de carbono o con vapor de agua, a temperaturas elevadas, materiales previamente carbonizados. Luego en 1903, Tswett utiliza columnas rellenas de materiales silíceos para la separación de clorofila y otros pigmentos de las plantas; durante ese proceso descubre la adsorción selectiva e introduce el término “cromatografía de adsorción en columna sólido-líquido”. Este descubrimiento no fue sólo el principio de una nueva técnica analítica sino también el origen de un nuevo campo de las ciencias de la superficie. En la actualidad, la cromatografía es un campo de conocimiento, independiente y bien desarrollado, derivado de la adsorción y uno de los métodos analíticos más importantes. En 1904, Dewar estudiando la adsorción de aire por carbón vegetal observó que se producía una adsorción selectiva del oxígeno. En 1911 se funda en Amsterdam la factoría NORIT, que en la actualidad continúa siendo una de las más importantes del mundo en la preparación de carbones activados. En ese mismo año se construye en Hajnowka (Este de Polonia) una planta de destilación de madera que producía inicialmente carbones activados a partir de madera (Valenzuela Calahorro, 2005).

En 1941, Martín y Synge introducen en la práctica del laboratorio la partición por cromatografía sólido-líquido, tanto en columna como en capa fina. En 1956, Barrer y Breck desarrollaron un método de síntesis de unos nuevos y potentes adsorbentes, las zeolitas; y ese mismo año la North-American Linde Company inició la producción de zeolitas sintéticas a escala industrial (Valenzuela Calahorro, 2005).

A medida que se desarrollaba la industria química se ponía de manifiesto la gran importancia que tienen para la misma los procesos de adsorción. Tanto fue así que el estudio de estos procesos llegó incluso a los libros de texto de

la época, libros que, a pesar de su carácter eminentemente empírico, fueron considerados entonces como innovadores. Entre esos libros cabe citar los escritos por Freundlich, Adam, Schwab, Rideal y McBain. Menos conocido, pero no menos importante que los anteriores, fue en su época el de Ledoux, que representa el primer intento de agrupar y sistematizar lo que se podría llamar "conocimientos y tecnología de la adsorción". A estos libros, editados en la década de 1940, se les concede gran importancia en el campo de la adsorción, pues recopilan todos los aspectos fundamentales de la adsorción entonces conocidos. Hoy no sería posible hacer algo semejante, debido fundamentalmente a la enorme extensión de los conocimientos teóricos y prácticos de esta ciencia y de su tecnología; que aparecen dispersos en cientos de libros, miles de artículos publicados en diferentes revistas especializadas, patentes, informes no publicados y otros muchos estudios de naturaleza diversa. De la revisión de muchas de las publicaciones aludidas se deduce que en la actualidad los procesos de adsorción encuentran aplicación en muy diversos campos (Valenzuela Calahorro, 2005).

Se hizo un estudio del proceso de electrocoagulación y la operación de adsorción que fue enfocado desde el punto de vista de la protección del ambiente con la idea de no sobrepasar la capacidad de carga del planeta, que solicita el cuidado de la comunidad biótica, teniendo en cuenta que los ecosistemas de la tierra tienen unos límites, la sostenibilidad supone ajustarse a ellos. Actualmente, los términos sostenibilidad y desarrollo sostenible resultan intercambiables dichos términos, llevan a la consideración de las necesidades y deseos de las generaciones futuras, en la 29ª Conferencia General de la UNESCO en 1997 se aprobó la Declaración sobre las responsabilidades de las generaciones actuales para con las futuras generaciones la que está en plena consonancia con el Informe Brundlandt, su artículo 1 reza así: "Necesidades e intereses de las generaciones futuras: las generaciones actuales tienen la responsabilidad de garantizar la plena salvaguardia de las necesidades y los intereses de las generaciones futuras." (López, 2007)

2.2. Antecedentes de investigación

Los compuestos orgánicos refractarios presentes en aguas residuales constituyen un problema ambiental, especialmente por su interferencia en el proceso fotosintético que realizan los organismos. En la actualidad hay más de diez mil diferentes tipos de pigmentos y colorantes sintéticos que son usados en diferentes Industrias como la textil, papelera, curtiembre, alimenticia, farmacéutica, entre otras (Cortazar Martínez, 2013).

(Arango, 2007) en su investigación sobre diseño de celdas de electrocoagulación, manifiesta que la caracterización físico química del agua residual sintética de textiles permite diseñar un sistema de electrocoagulación el que servirá para el estudio de los diferentes parámetros involucrados en la remoción de contaminantes refractarios.

Arango Ruíz & Garcés Giraldo, (2009), en su artículo “Remoción del colorante azoico amaranto de soluciones acuosas mediante electrocoagulación”, cuyo objetivo es estudiar la remoción del colorante azoico amaranto de soluciones acuosas usando electrocoagulación, empleó aguas residuales sintéticas y utilizó un diseño experimental factorial 3x2x3 que obedece a variaciones de pH, densidad de corriente y tiempo de tratamiento. Las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de remoción de demanda química de oxígeno y color. Se encontró que las remociones de demanda química de oxígeno fueron del orden del 98,3 % y las de color del 99,3% a pH de 4, densidad de corriente de 40,86 A/m² y a 15 minutos de tratamiento. Se concluye que desde el punto de vista de los aspectos técnicos, la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de rojo amaranto para la remoción de color, en medio ácido.

(Arango Ruíz A. , 2011, pág. 58), en su artículo “Uso de la electrocoagulación para remoción de tartrazina en soluciones acuosas”, da cuenta del estudio de la remoción del colorante azoico tartrazina de soluciones acuosas usando electrocoagulación con electrodos de hierro y aluminio, en aguas residuales

sintéticas con una concentración de 100 mg/L de tartrazina. En este estudio se usa nuevamente un diseño experimental factorial 3x2x3, cuyas variables fueron las mismas. Las variables de respuesta medidas fueron porcentajes de remoción de DQO y color. En los resultados se obtiene que las remociones de DQO fueron del orden del 95,5 % y las de color del orden del 99,4 % a pH de 4, densidad de corriente de 43,23 A/m² y a 12 minutos de tratamiento. Del estudio se establece que desde el punto de vista de los aspectos técnicos, la electrocoagulación es una tecnología que puede utilizarse en soluciones acuosas de tartrazina para la remoción de color.

(Gil Pavas, 2008) indicó, según la investigación del Departamento de Ingeniería Ambiental del Instituto de Tecnología Gebze, sobre los efluentes de la industria textil, obteniendo como resultado que el desempeño de electrodos de hierro es superior a los de aluminio, así mismo, el consumo de energía es menor en los electrodos de hierro que para el aluminio. Se debe considerar que las conductividades altas mejoran el desempeño del proceso. El mismo autor, en una investigación del 2003, determinó que el pH es un factor importante en la remoción de color y DQO. De la misma manera, encontró que el pH final es más alto cuando se opera con electrodos de aluminio, lo cual genera mejores resultados. El autor señala que trabajaron con muestras sintéticas y reales de colorantes de la industria textil, obteniendo remociones entre 80-90% en las muestras reales, y del 95% en el caso de soluciones sintéticas muy diluidas. Además precisa que este experimento se realizó utilizando electrodos de hierro a escala laboratorio, en ensayos en lotes, en continuo, obteniendo resultados similares.

En lo relacionado a la reutilización del efluente de textiles, después del tratamiento electroquímico (López-Grimau, Amante García, & Gutiérrez, 2010, pág. 182), explican el procedimiento de decoloración de los efluentes mediante una célula electroquímica asistida por luz ultravioleta. Aquí el agua decolorada almacena en un depósito para su posterior reutilización en el proceso de tintura. Este sistema de tratamiento y reutilización permite ahorrar el 70% de agua y el 60% de la sal necesario para preparar los baños de tintura. Lo que aparte de reportar un ahorro económico directo, también, supone un

ahorro en el canon de vertido de aguas residuales. Determinó además que, por el contrario, si se quiere hacer un proceso continuo de sucesivas reutilizaciones, en algunas ocasiones y en función del color requerido, deberá aumentarse la cantidad de colorante respecto de la fórmula inicial para evitar una merma en la calidad de las tinturas. Precisamente por ello es importante la realización del estudio económico para demostrar su viabilidad.

(Kim, 2015) realizó un estudio a escala piloto utilizando el proceso de electrocoagulación-electro flotación para tratar el tinte textil de aguas residuales crudas para evaluar el rendimiento del tratamiento. Investigó los efectos de algunos factores clave, como la densidad de corriente, el tiempo de retención hidráulica, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y color. Las variables operativas fueron densidad de corriente de 0-300 A m⁻², tiempo de retención de 0-30 min. Bajo las condiciones operativas sin coagulante añadido, se eliminaron los máximos de 88%, 84% y 99% de, sólidos suspendidos totales, demanda química de oxígeno y color, respectivamente, con un tiempo de retención hidráulica de 30 min.

2.3. Bases teóricas

2.3.1. Fundamentos de Electroquímica

El conocimiento de la electroquímica como ciencia se debe a las diferentes investigaciones de Galvani, Volta y Petrov, quienes hace más de cien años revelaron las pilas electroquímicas. Luego Davy y Faraday experimentaron la electrólisis, Arrhenius la teoría de la disociación de los electrolitos y Nernst sobre la termodinámica de los procesos electródicos. La teoría de Arrhenius fue estudiada por Debye y Huckel quienes elaboraron la teoría electrostática (Enciclopedia Práctica del Estudiante, 2012).

La Ingeniería Electroquímica es una rama importante dentro de la química que tiene como objetivo principal el estudio, diseño y manipulación de los diferentes equipos y procesos donde se produce una interconversión o

transformación entre energía química y eléctrica. Las reacciones químicas que ocurren en el interfaz de un electrodo puede ser un metal y un conductor iónico el electrolito es una solución o un sólido (Barrera, 2014).

En el tratamiento de aguas residuales por primera vez se propuso la electroquímica en 1889 en Reino Unido, estas tecnologías son consideradas como un paso indispensable en el tratamiento de aguas residuales que contienen compuestos refractarios. Mediante el tratamiento electroquímico se remueven tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos (Barrera, 2014).

Dentro de las tecnologías avanzadas que se están aplicando desde muchos años está la electroquímica industrial para la producción limpia de productos y el tratamiento de efluentes en forma sustentable desde un punto de vista ambiental. La descontaminación electroquímica es el resultado de la combinación de varios procesos, aún en discusión, que pueden resumirse en: electro reducción, electro oxidación, electrocoagulación y electro flotación. La electro reducción y la electro oxidación implican la transformación química sobre la superficie del electrodo de la especie indeseable, dando lugar a un producto no contaminante o eliminándolo directamente de la solución, como es el caso de la deposición de metales por electrólisis. En algunas situaciones, mediante electro oxidación es posible obtener en forma controlada especies altamente reactivas (Cl_2 , H_2O_2) que pueden actuar como descontaminantes (Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011).

Las nuevas aplicaciones de la Ingeniería Electroquímica han combinado con el surgimiento de una mayor responsabilidad social buscando el mantenimiento del Medio Ambiente, lo que conlleva la cruda realidad de aplicar nuevas tecnologías de tratamiento más provechosos en cuanto a obtener excelentes resultados y reducir costos (Ibáñez, 2014).

2.3.1.1 Celdas Electroquímicas

Una celda electrolítica es una celda electroquímica en la cual una corriente eléctrica impulsa una reacción que de otra forma sería no espontánea. El

proceso de producir un cambio químico en una celda electrolítica se llama electrólisis (Ebbing & Gammon, 2009).

Las celdas electroquímicas en las que se provoca una reacción química mediante la adición de energía eléctrica se llaman celdas electrolíticas. Los dispositivos que producen energía eléctrica mediante una reacción química son las celdas galvánicas. Estas últimas se subdividen usualmente según su forma de operación: las celdas de combustible son reactores de estado estacionario en los que se dosifican los reactivos en forma continua y de los que se extraen los productos también en forma continua, mientras que las celdas primarias son dispositivos de estado no estacionario que contienen cantidades iniciales fijas de reactivos. Hay un tercer tipo de celdas electroquímicas conocidas como *secundarias*, que funcionan como las galvánicas cuando están en uso; pero que se pueden regenerar (“recargar”) invirtiendo la reacción de celda por medio de la aplicación de energía eléctrica (Perry, 1992, págs. 4-93).

2.3.1.2 Electrólisis

La electrólisis es una tecnología muy importante en la electroquímica mediante la cual se provoca un cambio químico en un líquido por la intervención de la energía eléctrica, la misma se introduce mediante la aplicación de una diferencia de potencial entre los elementos conductores (electrodos) que se encuentran sumergidos en el líquido, en donde se provoca la reacción química, este debe ser conductor y contener sustancias capaces de oxidarse o reducirse. La diferencia de potencial genera un paso neto de corriente eléctrica (electrones) entre los electrodos, con la consiguiente oxidación de algunas especies en la superficie de alguno de los electrodos (ánodo) la reducción de otras en el (cátodo) (Barrera, 2014).

El electrodo negativo presenta un exceso de e^- , se comporta como reductor, pues cede dichos electrones a un ion positivo que carezca de ellos. Igualmente, el polo positivo de una celda electrolítica actúa como oxidante, capturando los e^- , de exceso que posean los iones negativos. Los metales son

considerados como conductores de primera, ya que poseen e^- libres que pueden moverse entre los átomos con facilidad (Mondragón, 2005) .

2.3.1.3 Reacciones Electroquímicas

Abarca fenómenos de dos tipos: eléctricos y químicos. Sin embargo, todo proceso químico entraña una reagrupación de partículas cargadas, núcleos atómicos y electrones y por lo tanto, los fenómenos químicos y eléctricos constituyen, hablando en rigor, un todo único. Así pues, la noción de electroquímica como una rama de las ciencias químicas es menos amplia de lo que podría deducirse de su propia denominación. Para determinar el área de los fenómenos que estudia la electroquímica es indispensable considerar las diferencias que existen entre las reacciones químicas y las electroquímicas (Damaskín & Petri, 1981, pág. 9).

Con lo cual podemos definir que “Las reacciones electroquímicas son las de reducción-oxidación conocidas como redox, las cuales se basan en transferencia de electrones entre un conjunto de especies químicas, en las cuales se presentará una especie oxidante y una reductora, que a su vez alcanzaran una forma reducida y una forma oxidada respectivamente”. (Gil Pavas, 2008, pág. 4).

Según lo anterior para que se lleve a cabo este tipo de reacciones debe haber una especie que ceda sus electrones y otra que los acepte. El reductor es la especie química que tiende a ceder electrones de su estructura química al medio, quedando con carga mayor a la que tenía, mientras, el oxidante es la especie que tiende a captar esos electrones, quedando con carga menor. (Gil Pavas, 2008, pág. 4).

Una reacción electroquímica presentada la siguiente ecuación general (Rajeshwar & Ibañez, 1997):



En donde:

O , es la especie oxidada

R , es la especie reducida

$n e^-$, el número de electrones transferidos por mol

Los dos procesos más importantes que rigen el comportamiento de este tipo de reacciones son (Rajeshwar & Ibañez, 1997) :

- Transporte de masa: es el movimiento de masa desde la solución a la superficie del electrodo, debido a diferencias en el potencial eléctrico (migración), químico (difusión) y por el movimiento global del líquido.
- Transferencia de electrones: existe una contribución de cada densidad de corriente parcial (anódica y catódica) a la densidad de corriente total, esta corriente de intercambio junto al sobre potencial afecta la velocidad de la reacción, pues a mayor corriente circulando mayor será la velocidad de reacción.

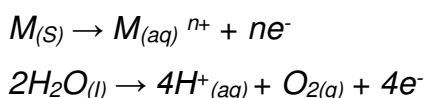
2.3.1.4 Potenciales de Oxidación – Reducción

El potencial de reducción de una sustancia es la tendencia de los átomos para aceptar e^- , es decir, se refiere a que tan fácilmente se reducen estos átomos. El potencial de una sustancia cualquiera se especifica en relación con otra sustancia, tomada como patrón. La unidad internacional para expresar el potencial eléctrico es el voltio por ejemplo, para el sistema, de Zn y H, el voltímetro muestra que hay una diferencia de potencial de 0,76V este valor corresponde a la reacción de oxidación del Zn, simbolizado como $\epsilon^0 \text{ Zn/Zn}^{2+} = 0,76\text{V}$. El potencial de reducción es el mismo valor: $\epsilon^0 \text{ Zn/Zn}^{2+} = -0,76\text{V}$ (Mondragón, 2005).

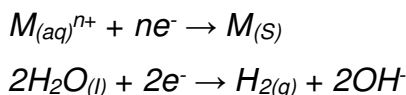
La corriente eléctrica que se genera en una celda electroquímica es consecuencia de la diferencia de potencial que se establece entre los electrodos ($\Delta\epsilon$) y se conoce como fuerza electromotriz (fem) de la celda. Un valor positivo de ϵ^0 significa que la sustancia se reduce más fácilmente que los iones H^+ . Un valor negativo significa que la sustancia se reduce con más dificultad que los iones H^+ (Mondragón, 2005).

En una celda simple de electrocoagulación donde solo hay un ánodo y un cátodo los cuales son hechos de un metal M, se presentan en general las siguientes reacciones electroquímicas (Mollah M., y otros, 2004).

En el ánodo se presentan las siguientes reacciones de oxidación (Mollah M., y otros, 2004):

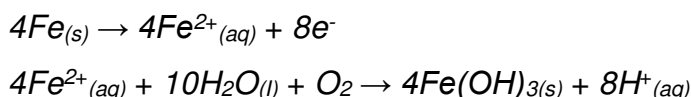


En el cátodo se presentan las siguientes reacciones de reducción (Mollah M., y otros, 2004):

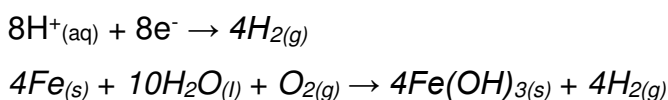


Si los electrodos son de hierro se espera la formación de $Fe(OH)_n$ y polihidróxidos como: $Fe(H_2O)_6^{3+}$, $Fe(H_2O)_5(OH)^{2+}$, $Fe(H_2O)_4(OH)_2^{+}$, $Fe_2(H_2O)_8(OH)_2^{4+}$, $Fe_2(H_2O)_6(OH)_4^{4+}$. A continuación se presenta el mecanismo general de reacción cuando los electrodos son de hierro y $n=3$ (Mollah M., y otros, 2004).

En el ánodo:



En el cátodo:



2.3.1.5 Leyes de la Electrólisis o de Faraday

Michael Faraday, Físico y Químico, ejecutó varios estudios cuantitativos concerniente a la íntima relación que existe entre la cantidad de electricidad que atraviesa una solución. Estos postulados relacionan la cantidad de

electricidad consumida o generada durante un proceso electroquímico con la masa de los reactivos presentes (Arbeláez, 2005).

- **Primera ley de Faraday**

Algunos metales como el Na, Mg o Al se producen industrialmente por electrólisis de sus sales fundidas. En el proceso se consumen grandes cantidades de electricidad, que pueden relacionarse matemáticamente con la cantidad de producto formado sobre los electrodos de la celda electrolítica. Por ejemplo, en la electrólisis del NaCl, el ion sodio se reduce según la reacción: $\text{Na}^+ + 1\text{e}^- \rightarrow \text{Na}$. Así, un electrón es requerido para reducir un ion de sodio. Es decir, para reducir un mol de iones Na^+ , equivalente a 23 gr, se necesita un mol de e^- . La carga de un electrón es $1,602 \cdot 10^{-19}$ Coulombios (C) y la carga de un mol de electrones es: $1,602 \cdot 10^{-19} \text{ C/e} \cdot 6,023 \cdot 10^{23} \text{ e/mol} = 96.500 \text{ C/mol}$. La relación entre la cantidad de cargas invertidas en la producción de una determinada masa de producto se resume en la primera ley establece que: “la masa de producto obtenido o de reactivo consumido en un electrodo durante la electrólisis, es directamente proporcional a la cantidad de electricidad en culombios, que pasa a través del electrólito” (Arbeláez, 2005).

- **Segunda ley de Faraday:**

Establece que si varias soluciones electrolíticas son atravesadas por la misma cantidad de electricidad, las masas, de las sustancias depositadas o liberadas en los electrodos son proporcionales a sus masas equivalentes (eq) de los electrolitos disueltos. Las dos leyes de Faraday se cumplen para los electrolitos tanto fundidos como en solución. Su validez no se altera por variaciones de temperatura, presión, naturaleza del solvente y del voltaje aplicado (Mondragón, 2005).

Existen muchos métodos que se aplican para depurar efluentes con contaminantes con color siendo los de la industria textil un problema complejo de resolver. Los tratamientos de tipo biológico son utilizados con frecuencia en esta industria, estos pueden ser de tipo aerobio o anaerobio. Estos

reducen hasta cierto límite los parámetros como la DBO, DQO, fenoles, metales etc; se obtienen mejores resultados cuando se combinan con otros tratamientos avanzados como adsorción con carbón activado. Sin embargo, el efecto sobre la porción del color del efluente que se debe a colorantes textiles es generalmente escaso, debido a que algunos de los colorantes son adsorbidos durante los tratamientos biológicos. Este efecto es muy limitado en la remoción de colorantes reactivos hidrolizados (Mondragón, 2005).

Los tratamientos terciarios que se emplean en la remoción de colorantes generalmente no son suficientemente eficaces para reducir al mínimo el contenido de contaminantes más persistentes, por lo que se hace necesario introducir otros de tratamientos que logren este objetivo. Como los procesos de oxidación avanzada.

2.3.1.6 Procesos de Oxidación Avanzada

Los procesos de oxidación avanzada (POA), son aplicados en agua residual que tiene baja biodegradabilidad y una alta estabilidad química como es el caso de los colorantes.

Dentro de los procesos de oxidación avanzada se encuentran los siguientes procesos (Osorio Robles, Torres Rojo, & Sánchez Bas, 2011, pág. 47):

- Procesos de degradación fotoquímica (UV/O₃), (UV / H₂O₂)
- Fotocatálisis (TiO₂/UV), reactivos foto-Fenton)
- Procesos de oxidación química O₃ , O₃/H₂O₂, H₂O₂/Fe²⁺

A continuación en la figura 2, se detalla la clasificación de los procesos de oxidación avanzada, procesos homogéneos con aporte de energía o sin ella y en procesos heterogéneos (Osorio Robles, Torres Rojo, & Sánchez Bas, 2011, pág. 48):

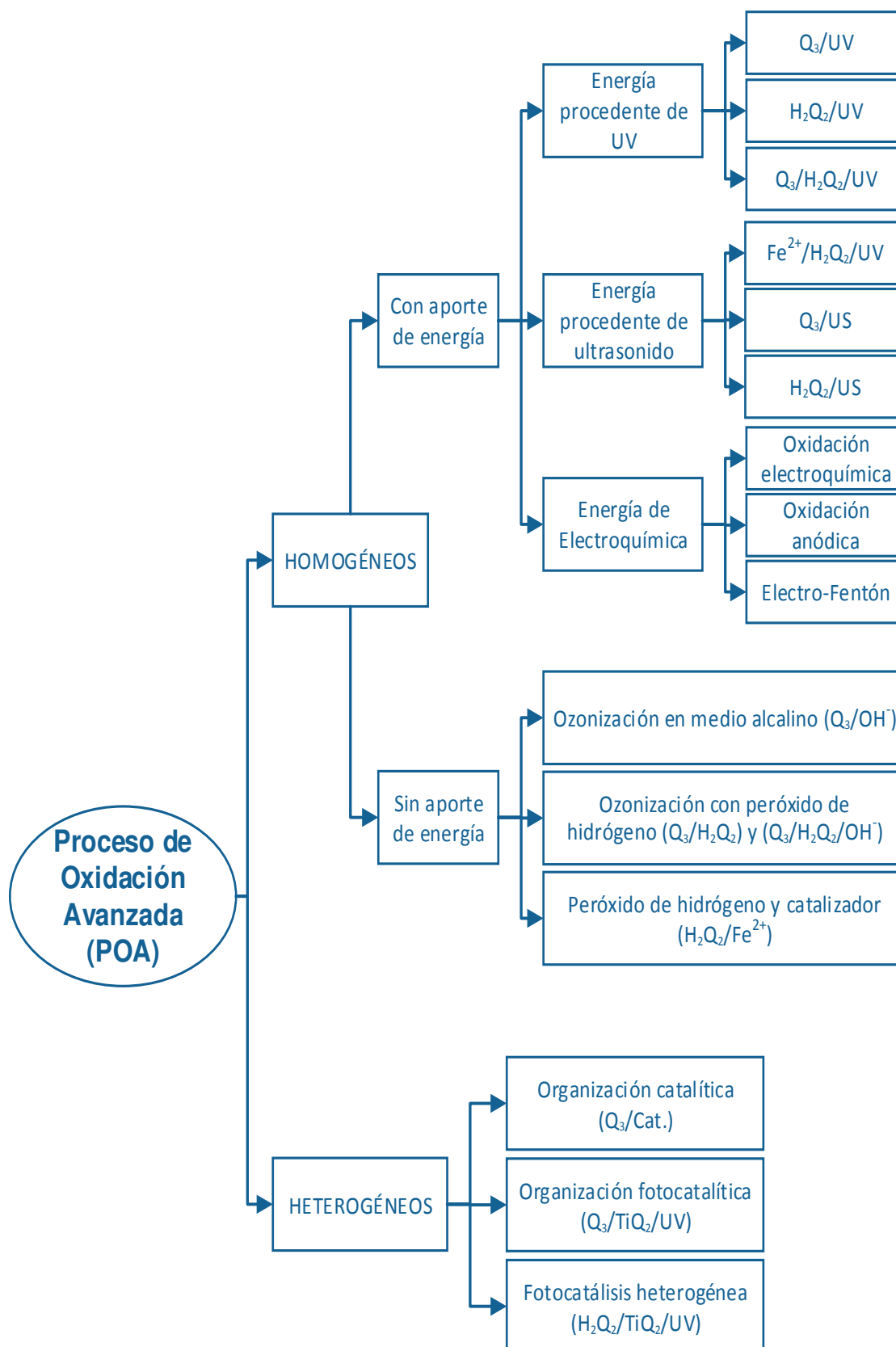


Figura 2. Clasificación de los procesos de oxidación avanzada (POA).
Fuente. Elaboración propia a partir de F. Osorio, 2014.

De acuerdo a (Osorio Robles, Torres Rojo, & Sánchez Bas, 2011, pág. 47). Los POA tienen la misma característica química que consiste en la producción de radicales OH^\bullet , los cuales son especies muy reactivas que actúan sobre la mayoría de las moléculas orgánicas, y son de baja selectividad.



En esta investigación se aplicara procesos de oxidación electroquímica con aporte de energía, específicamente electroquímica.

2.3.1.7 Electrocoagulación.

La electrocoagulación presenta una larga historia en la tecnología de tratamiento de aguas, en 1909 fue patentada en el Reino Unido. (Barrera, 2014), la define como un proceso eficiente para desestabilizar finalmente las partículas en agua natural o en la residual, usualmente se utiliza electrodos de aluminio o de hierro, y al aplicar la corriente eléctrica los ánodos producen iones de aluminio Al^{3+} o de hierro Fe^{2+} estos iones son muy buenos coagulantes y pueden hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermediarios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas que se hayan presentes en el agua, luego de la desestabilización se produce una aglomeración de partículas formando flóculos. En cambio en el cátodo se generan pequeñas burbujas de hidrógeno lo que permite que floculo flote facilitando la separación de las partículas del agua residual.

(Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011), indican que cuando los iones metálicos formados por oxidación del ánodo reaccionan con OH^- producidos en el cátodo por reducción del H_2O a H_2 . El hidróxido formado (rigurosamente, un óxido hidratado generalmente de hierro o aluminio trivalentes) actúan como agentes floculantes y adsorbentes del contaminante. Hay dos mecanismos propuestos para la formación anódica del hidróxido, siempre con formación de hidrógeno en el cátodo. En el primero de ellos, el hierro se oxida a Fe^{2+} y éste, por acción del oxígeno del aire, se hidroliza dando $\text{Fe}(\text{OH})_3$. Según el otro mecanismo, el Fe^{2+} forma $\text{Fe}(\text{OH})_2$ el que posteriormente se oxida a $\text{Fe}(\text{OH})_3$.

Barrera, (2014) manifiesta que las técnicas electroquímicas no solo son comparables con otras tecnologías en término de costo sino que resultan más eficientes y compactas. El tratamiento electroquímico aplicado para aguas residuales remueve contaminantes orgánicos e inorgánicos, los contaminantes se destruyen por oxidación directa o indirecta del proceso. Cuando se tiene oxidación anódica directa en primer lugar son adsorbidas sobre el ánodo y luego son destruidos debido a una reacción de transferencia electrónica anódica. En cambio cuando se tiene oxidación indirecta se produce una destrucción de los contaminantes por la oxidación generada por adición de un agente oxidante como hipoclorito, ozono, peróxido de hidrógeno de acuerdo a Janssen, 2002.

(Piña–Soberanis, y otros, 2011) en la revista Mexicana de Ingeniería Química, hacen un estudio de las reacciones en los procesos de electrocoagulación en el cual indica que los iones liberados durante la electrocoagulación forman largas cadenas de poli hidróxidos, los cuales son diferentes a los formados en la coagulación convencional cuando se añaden sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desecar con mayor facilidad los lodos residuales. Los flocs formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente.

Durante la formación de los hidróxidos metálicos, la generación de los iones está acompañada de la concentración electroforética de partículas alrededor del electrodo, las cuales neutralizan su carga coagulando. La corriente aplicada obliga a los iones OH^- a migrar hacia el ánodo, por lo que el pH en la capa límite es más alto que en el resto de la solución, lo que favorece la formación de hidróxidos del metal del electrodo (Piña–Soberanis, y otros, 2011).

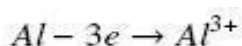
El hidróxido formado remueve los contaminantes presentes en el agua por complejación o atracción electrostática. Adicionalmente, en la proximidad de los electrodos el aumento de la concentración de los hidróxidos con carga

positiva atrae aniones como los bicarbonatos y los sulfatos que propician la precipitación del calcio y el magnesio, originando así un ablandamiento parcial del agua. Los mecanismos de remoción en electrocoagulación incluyen oxidación, reducción, coagulación, absorción, adsorción, precipitación y flotación (Piña–Soberanis, y otros, 2011).

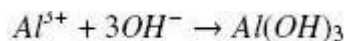
Los iones Al^{3+} ó Fe^{2+} son coagulantes muy eficientes para la floculación de partículas, por lo que en electrocoagulación (EC) son frecuentemente utilizados electrodos de hierro o de aluminio. Los iones de aluminio hidrolizado pueden formar largas cadenas de $Al-O-Al-OH$ las cuales pueden adsorber químicamente una gran cantidad de contaminantes. El aluminio es normalmente usado para el tratamiento de agua potable y el hierro para el tratamiento de aguas residuales. En el caso del hierro, el $Fe(OH)_3$ forma un coloide café rojizo y dependiendo del pH y de la disponibilidad de iones ferrosos, puede reaccionar con el oxígeno disuelto para dar Fe_3O_4 , (Piña–Soberanis, y otros, 2011).

Las reacciones químicas que se llevan a cabo en el ánodo son las siguientes (Piña–Soberanis, y otros, 2011):

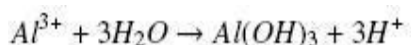
Para ánodo de aluminio:



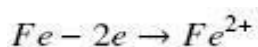
En medio alcalino:



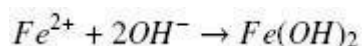
En medio ácidos:



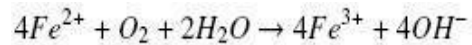
Para ánodo de hierro:



En medio alcalino:

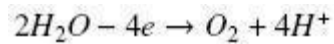


En medio ácido:

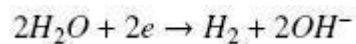


La electrólisis del agua produce oxígeno e hidrógeno de la siguiente forma:

En el ánodo:



En el cátodo es:



Un reactor de electrocoagulación es una celda electroquímica donde el ánodo metálico generalmente de aluminio y algunas veces de hierro, como en ésta investigación, se usa para dosificar al agua contaminada un agente coagulante. La electrocoagulación produce cationes metálicos in situ, en lugar de dosificarlos externamente. Se puede observar en las Figuras 3 y 4.

Simultáneamente, se generan gases electrolíticos, especialmente hidrógeno, en el cátodo. La electrocoagulación tiene la capacidad de remover un amplio rango de contaminantes incluyendo sólidos suspendidos, metales pesados, colorantes, materia orgánica, grasas, aceites, iones y radionúclidos. Las propiedades fisicoquímicas de los contaminantes influyen e interactúan en el sistema de remoción de contaminantes, por ejemplo, los iones son probablemente electros precipitados, mientras que los sólidos suspendidos son absorbidos por el coagulante (Barrera, 2014).

En general, durante un tratamiento por electrocoagulación se presentan los siguientes procesos:

- Reacciones electrolíticas en la superficie del electrodo.
- Formación de coagulantes en la fase acuosa por oxidación electrolítica del electrodo de sacrificio.
- Desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión.

- Los coagulantes absorben a los contaminantes solubles o coloides y se remueven por sedimentación o por flotación.
- Adición de las fases desestabilizadas para formar floc

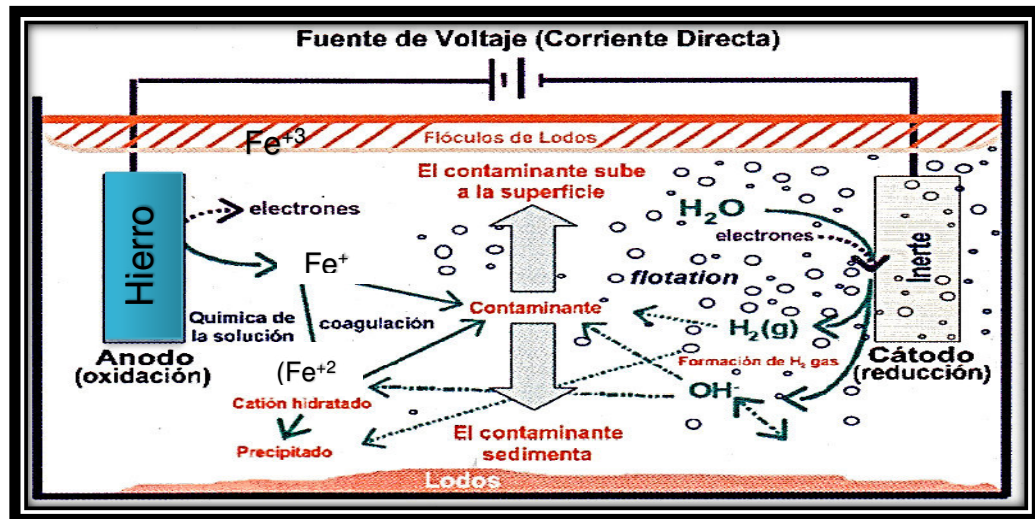


Figura 3. Remoción de contaminantes con electrodo de Hierro.
Fuente. Adaptado de Barrera, 2014

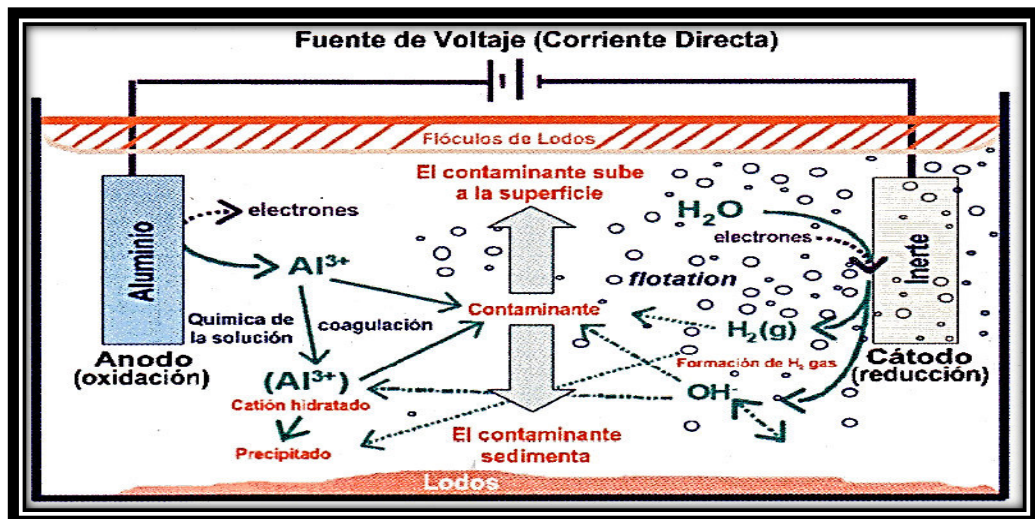


Figura 4. Remoción de contaminantes con electrodo de aluminio.
Fuente. Barrera, 2014

2.3.1.7.1 Factores que afectan la electrocoagulación.

Barrera (2014) distingue seis factores que afectan a la electrocoagulación son: densidad de corriente, concentración de cloruros, efecto del pH, tipo de material de electrodo, efecto de la temperatura, diseño del reactor.

- **Densidad de corriente o carga.**

El suministro de corriente a un sistema de electrocoagulación determina la cantidad de iones Al^{3+} o Fe^{2+} liberados por los electrodos respectivos. Para el aluminio, la masa equivalente electroquímica es 335,6mg/Ah (miligramos/amperio horas) para el hierro es 1041mg/Ah. Una corriente grande significa una unidad pequeña de electrocoagulación y, además, existe la posibilidad de gastar energía eléctrica calentando el agua (Arroyo Núñez, 2011, pág. 28).

Para que el sistema de electrocoagulación opere por un largo periodo de tiempo sin mantenimiento se sugiere que la densidad de corriente se mantenga entre 20-25 A/m². La selección de la densidad de corriente debe realizarse en conjunto con otros parámetros de operación, como valores de pH, temperatura y flujo, para asegurar una alta eficiencia de corriente (Arroyo Núñez, 2011, pág. 28).

- **Conductividad**

Un incremento en la conductividad eléctrica, genera un incremento en la densidad de corriente, cuando se mantiene constante el voltaje alimentado a la celda de electrocoagulación, adicionalmente, el incremento de la conductividad manteniendo la densidad de corriente constante, produce una disminución del voltaje aplicado.

La adición de algunos electrólitos tales como NaCl o CaCl_2 generan un aumento en la conductividad del agua residual, adicionalmente se ha encontrado que los iones de cloruro pueden reducir los efectos adversos de iones como HCO_3^- y $\text{SO}_4^{=}$ pues la presencia de iones carbonatos o sulfatos pueden conducir a la precipitación de Ca^{+2} y Mg^{+2} produciendo una capa insoluble depositada sobre los electrodos, que aumentaría el potencial entre los electrodos decreciendo así la eficiencia de la corriente. Se recomienda, sin embargo, que para un proceso de electrocoagulación normal se mantengan cantidades de Cl^- alrededor del 20% (Arango-Ruíz, 2014, pág. 91).

- **Temperatura**

Los efectos de la temperatura sobre la electrocoagulación no han sido muy investigados, pero se ha encontrado que la eficiencia en la corriente incrementa inicialmente hasta llegar a 60°C punto donde se hace máxima, para luego decrecer. El incremento de la eficiencia con la temperatura es atribuida al incremento en la actividad de destrucción de la película de óxido de aluminio de la superficie del electrodo (Arango-Ruíz, 2014, pág. 91).

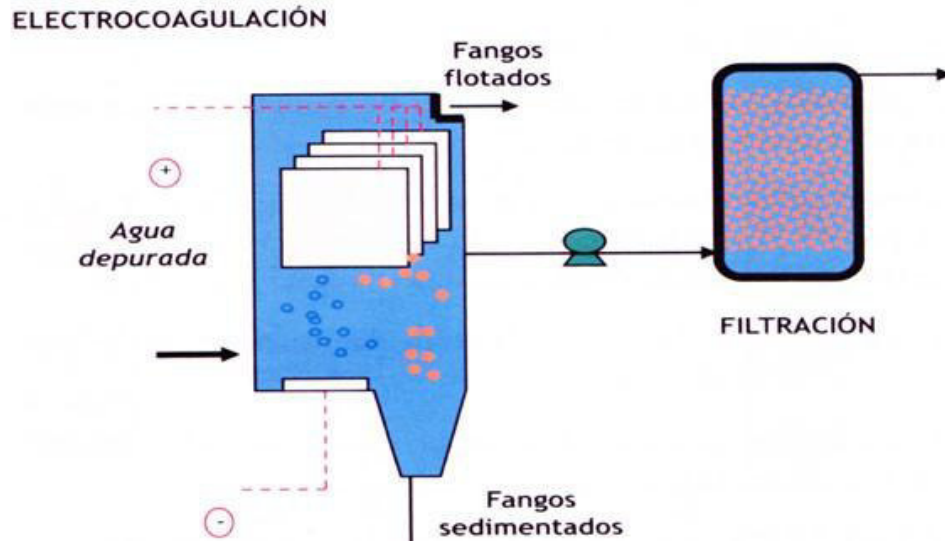
- **Efecto pH.**

El efecto pH en el agua residual para los procesos de electrocoagulación se refleja en la eficiencia de corriente, así como en la solubilidad de hidróxidos metálicos. El pH de trabajo depende mucho de la naturaleza de los contaminantes; sin embargo, se ha encontrado que las eficiencias de corrientes del aluminio son más altas a condiciones ácidas o alcalinas que a condiciones neutras.

Los electrodos de hierro se han usado en aguas residuales caracterizadas por presentar coloración y de giro textil, se han empleado influentes alcalinos logrando alta remoción de color y demanda química de oxígeno. Las mejores eficiencias de remoción de contaminantes reportadas utilizando electrodos de aluminio son cercanas a un pH neutro (Arroyo Núñez, 2011, pág. 29).

- **Tipo de material de los electrodos.**

Los materiales que se suelen emplear en la electrocoagulación son aluminio y hierro. La configuración de los electrodos, generalmente es en forma de platos de aluminio o hierro; se ha encontrado que la principal aplicación de los electrodos de aluminio es para el tratamiento de aguas, debido a su alta eficiencia en la autogeneración de agentes coagulantes.



*Figura 5. Esquema de un proceso de electrocoagulación.
Fuente. Barrera. 2014*

En el proceso de electrocoagulación figura 5, existen muchos tipos de celdas electroquímicas, de acuerdo a (Barrera, 2014) su clasificación atiende a diferentes criterios:

- Dirección de flujo de agua residual
- Modo de circulación
- Tipo de conexión eléctrica
- Finalidad de la celda

En base a la dirección de flujo en la celda, los reactores se clasifican en flujo horizontal y vertical, de acuerdo a la Figura 6.

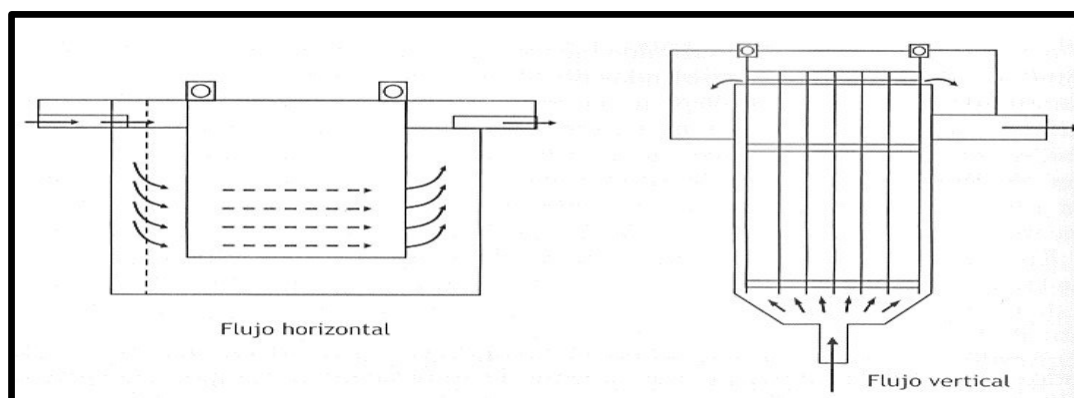


Figura 6. Tipos de flujo hidráulico en reactores de coagulación.

Fuente. Barrera, 2014.

En lo que respecta al modo de circulación del agua entre los electrodos existen celdas de canales múltiples y de un solo canal, como se puede observar en la Figura 7. La de canales múltiples es muy sencilla su disposición, pero tiene la desventaja que debido al pequeño flujo de electrolitos en cada uno de los canales, esta disposición favorecería al fenómeno de pasivación de los electrodos (a). En lo referente al tipo de conexión electrónica, los reactores se pueden clasificar en monopolar y bipolar (b).

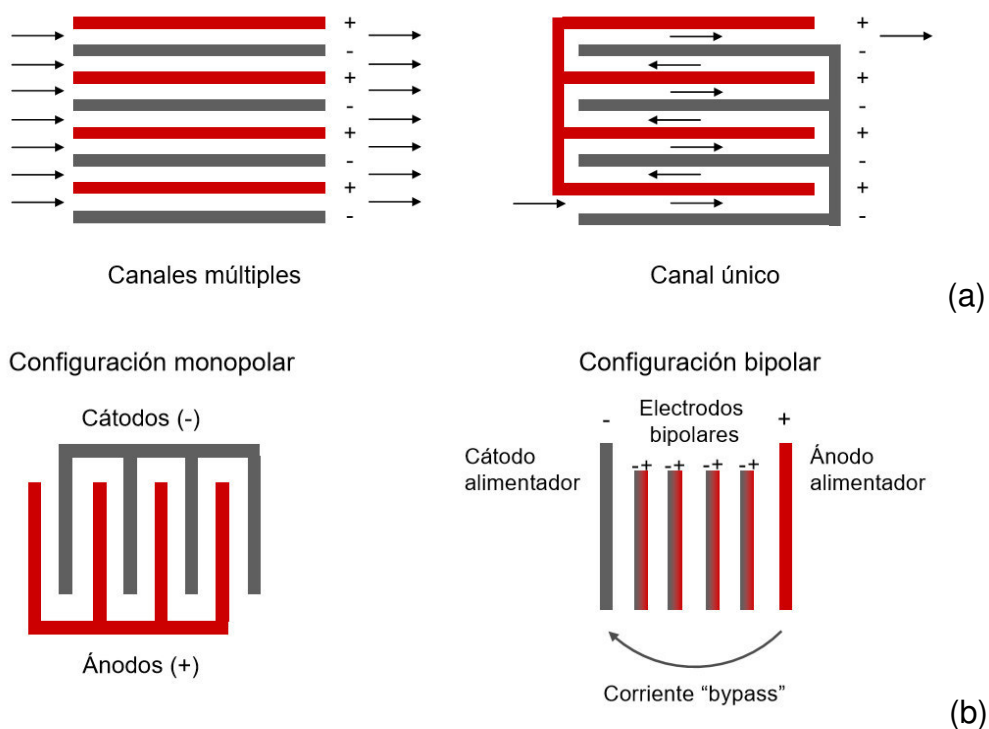


Figura 7. Configuraciones de celdas de electrocoagulación.

Fuente. (Barrera, 2014).

A continuación las Ventajas en electrocoagulación (Barrera, 2014):

- Las burbujas producidas durante la electrocoagulación tienen mayor estabilidad que las generadas en los tratamientos de efluentes con flotación de aire comprimido y de flujo de aire disuelto, por lo que conservan su gran superficie de contacto y por tanto, aumenta la eficiencia de remoción.
- Este tratamiento electroquímico provoca una mejor y rápida ruptura de las emulsiones, comparado con los equipos convencionales para separación de aceites.
- La cantidad de lodos generados son menores que para otros métodos tradicionales, ya que se efectúa de manera simultánea flotación y coagulación.
- Permite la reducción de una amplia variedad de contaminantes, como: metales pesados, grasa y aceites, materia orgánica, fosfatos y cianuros.
- Sus costos de operación son relativamente bajos si se realiza un apropiado diseño del reactor, selección de los materiales para electrodos, y una optimización de los parámetros de funcionamiento. Este proceso requiere poca corriente eléctrica y bajos costos de mantenimiento.
- El líquido separado por electrocoagulación puede ser reprocesado como subproducto, lo cual permite que el efluente tratado pueda ser reutilizado.
- Los equipos para electrocoagulación son compactos y fáciles de instalar, factores que son muy apreciables cuando no se dispone de espacio suficiente.
- Este proceso es sencillo de automatizar debido a que el control de dosificación se realiza mediante el ajuste de corriente.

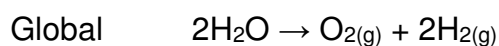
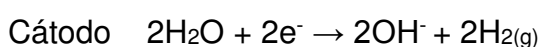
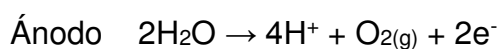
Entre las desventajas de la electrocoagulación se encuentran requerimientos como el reemplazo periódico del electrodo de sacrificio, y que el agua tenga una conductividad mínima diferente de cero que varía según el diseño del reactor lo que limita su uso en aguas con baja cantidad de sólidos disueltos.

En el caso de la remoción de componentes orgánicos se puede formar compuestos orgánicos tóxicos al emplear el método de electrocoagulación. También como una desventaja se encuentra la formación de una película de óxido impermeable en el cátodo que interfiere con el buen desempeño de la celda, este efecto se puede disminuir cambiando la polaridad de la celda. Los costos de operación de la celda de electrocoagulación pueden ser altos donde los costos de la electricidad sean altos (Barrera, 2014) .

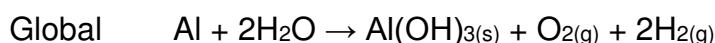
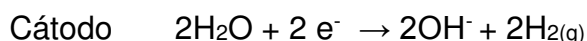
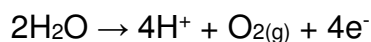
2.3.1.8 Electroflotación

Es un proceso complejo, ya que el tamaño de las burbujas producidas por electroflotación viene principalmente influenciado por la superficie de los electrodos, del material de electrodo y de su posición en la serie electromotriz. También en función del pH en medios ácidos las burbujas de hidrógeno son mayores que en pH neutros o alcalinos. Además de igual forma depende de la curvatura de la superficie en algunas geometrías de electrodos. Las burbujas arrastran a las partículas hacia la superficie del tanque, donde son recolectadas por un sistema de captación que cuenta con canaletas, las cuales conducen a las partículas o los contaminantes hacia un tanque externo en el que es posible concentrar los contaminantes o las partículas sólidas de interés para su posterior procesamiento. El agua tratada que está en el fondo se bombea a otro tanque para su posterior uso (Barrera, 2014).

Los electrodos empleados para la electroflotación son materiales inertes, como el platino, el grafito, el titanio o el acero al carbón. Los cuales se pueden utilizar como ánodo o cátodo, indistintamente, dependiendo de su aplicación en cada caso. Generalmente, la electroflotación se produce cuando hay una electrolisis del agua, y como resultado se producen pequeñas burbujas de oxígeno e hidrógeno a través de las reacciones.



Sin embargo, el proceso de electroflotación también puede ocurrir simultáneamente con el proceso de electrocoagulación, ya que ocurren las reacciones, cuando se emplean ánodos de sacrificio como el Fe y el Al:



Los iones aluminio que se generan se hidrolizan para formar hidróxidos y polihidróxidos dependiendo del pH de la solución acuosa. Los hidróxidos de aluminio o hierro que se forman en solución tienen una gran capacidad para remover contaminantes de tamaño coloidal. Adicionalmente, las burbujas de gas que se forman debido a la electrolisis provocan la flotación de los contaminantes y es por ello que, en muchas ocasiones, los fenómenos de electrocoagulación, electrofloculación y electroflotación se llevan a cabo de manera simultánea (Barrera, 2014) .

2.3.2 Adsorción

Otra operación que también se aplica con buenos resultados es la adsorción, proceso por el cual átomos o moléculas de una sustancia que se encuentra en determinada fase, son retenidos en la superficie de otra sustancia, que se encuentra en otra fase. Como resultado de este proceso, se forma una capa de líquido o gas en la superficie de una sustancia sólida o líquida.

La adsorción en carbón activado es un proceso donde un sólido es utilizado para eliminar una sustancia soluble del agua. En este proceso el carbón activo es el sólido. El carbón activo se produce específicamente para alcanzar una superficie interna muy grande (entre 500 - 1500 m²/g). Esta superficie interna grande hace que el carbón tenga una adsorción ideal. El carbón activo viene en dos variaciones: Carbón activado en polvo (PAC) y carbón activado

granular (GAC). La versión de GAC se utiliza sobre todo en el tratamiento de aguas residuales.

La operación unitaria adsorción se realiza sobre una superficie de un sólido adsorbente mediante la acumulación de una sustancia en una fase líquida o gaseosa (absorbible o adsorbato). Una capa de moléculas de soluto se acumula sobre la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. (Ramalho, 2014). En el interior de un sólido, las moléculas están rodeadas totalmente por moléculas similares es decir están sujetas a fuerzas equilibradas tal como lo indican las fuerzas en la Figura 8.

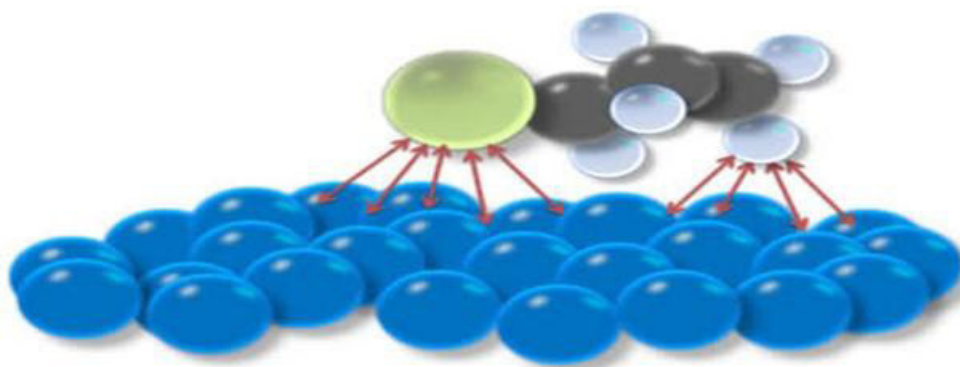


Figura 8. Representación de las fuerzas en un soluto

Fuente. <http://www.chemvironcarbon.com/es/carbon-activo/adsorción>

Las moléculas que se encuentran en la superficie están sometidas a fuerzas no equilibradas ya que estas fuerzas residuales son lo suficientemente elevadas lo que hace que puedan atrapar moléculas de un soluto que se haya en contacto con el sólido este fenómeno se denomina adsorción física (o de Van der Waals).

Por ejemplo el carbón activado, el sólido se denomina adsorbente y el objetivo a adsorber se denomina adsorbato. La capacidad de adsorción es función de la superficie total del adsorbente, ya que cuanto mayor sea esta superficie, se dispone de mayor número de fuerzas no equilibradas para la adsorción.

Los carbones activados, por su gran porosidad, son usados ampliamente como adsorbentes en las operaciones industriales de purificación y de

recuperación química, que se debe a su extensa área superficial, entre 500 y 2 000m² g⁻¹, su gran volumen de poro y la presencia de grupos funcionales superficiales, en especial, grupos oxigenados (Catellar, Angulo, Zambrano, & Charris, 2013).

En el equilibrio de adsorción existe una proporción definida de soluto repartida entre las dos fases, líquida y sólida. La forma habitual de expresar esta distribución es la capacidad de equilibrio (q_e), definida como:

$$q_e = \frac{C_0 - C_e}{W} V$$

Siendo q_e la capacidad de equilibrio, que informa de la concentración de adsorbato en fase sólida, C_0 es la concentración inicial de adsorbible en fase líquida, C_e es la concentración de adsorbible en fase líquida en el equilibrio, V es el volumen de disolución y W es la masa de adsorbente. Las isothermas de adsorción son curvas construidas a partir de pares (C_e, q_e) a una temperatura constante. Pueden ocurrir varios tipos de relaciones isotérmicas de adsorción. Brunauer propuso, para adsorción en fase gas, cinco tipos de isothermas empleando los mecanismos de adsorción en función de las presiones relativas a las que ocurren. Sin embargo, en 1960 Giles propuso un sistema de clasificación de las isothermas de adsorción en disolución, empleándolas como diagnóstico de los mecanismos a través de los cuales ocurren. Divide las isothermas de adsorción en cuatro clases de acuerdo con la pendiente de la parte inicial de la curva y denominadas atendiendo a su forma. Así, las tipo “S” (S – shape), son aquellas en las que se produce una adsorción cooperativa. Esto es, a medida que aumenta la concentración en equilibrio aumenta la capacidad del sólido por retener el adsorbato (aumenta la pendiente a medida que aumenta la concentración); esto ocurre cuando se dan tres condiciones: la molécula de adsorbato es (a) mono funcional, (b) presenta una atracción intermolecular intermedia, y encuentra una competencia importante por los sitios activos por parte de las moléculas de disolvente o de otras especies adsorbidas. Las isothermas tipo “L” (Langmuir), son las más comunes ya que a medida que aumenta la concentración en

equilibrio en la fase fluida el número de centros activos disponibles disminuye, hasta llegar a una meseta que representa que el sólido ya no puede retener más adsorbato; esto implica que o bien las moléculas de adsorbato no se adsorben orientadas verticalmente o bien que no hay competencia con el disolvente por los centros activos. Las curvas tipo “H” (High affinity), son aquellas en las que el adsorbente tiene una gran afinidad por el adsorbato lo que ocasiona que aún a muy pequeñas concentraciones adsorba una cantidad significativa; se pueden considerar un caso especial de curvas tipo “L”. Finalmente, las curvas tipo “C” (Constant) se caracterizan por una proporción de centros activos constantes, es decir, muestran un comportamiento intermedio entre la del tipo “S” y la tipo “L” y se encuentran en sistemas donde el soluto penetra en el sólido más fácilmente que el disolvente. Este último tipo de curvas aparece en sistemas con sólidos porosos con moléculas flexibles y regiones con diferentes grados de cristalinidad, y con un soluto con más afinidad por el sólido que la que presenta el disolvente, y con dimensiones tales que pueda penetrar en regiones del sólido que todavía no hayan sido alcanzadas por el disolvente.

Las isothermas de adsorción pueden ser ajustadas y reproducidas a través de los denominados modelos de adsorción. Éstos no son más que diferentes relaciones entre la concentración en equilibrio en la fase fluida (C_e) y la concentración en equilibrio en la fase sólida superficial (q_e).

Todos los modelos enunciados a continuación, se describen aplicados a condiciones líquidas. Sin embargo, su uso también está recomendado para fase gas. Asimismo, se describen los modelos para adsorción de compuestos puros; la mayoría de estos modelos se pueden extender a isothermas de adsorción multicomponente, tanto los predictivos como los empíricos. Además existen otros modelos de uso exclusivo para adsorción multicomponente. La Teoría de la Solución Ideal Adsorbida (Ideal Adsorbed) (Meztanza, 2012) .

2.3.3 Remoción de colorantes refractarios

(Barrera, 2014, pág. 204) en su libro “Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales”, hace referencia a Panizza, 2009, Desoky,

2010 y Cruz-Gonzales 2010, sobre las propiedades de los colorantes sintéticos por su resistencia a la abrasión, la estabilidad fotolítica o la resistencia al ataque químico y biológico. Todo esto hace que los colorantes se mantengan inalterables durante largos periodos de tiempo y su presencia en el agua causa fenómenos como eutrofización, baja oxigenación, alteración de color y olor, lo cual los hace persistentes y bioacumulables. Todo esto hace que los colorantes no se puedan destruir mediante tratamiento convencional. Investigaciones recientes han mostrado una gran eficiencia de oxidación de colorantes sintéticos en aguas residuales, al utilizar electrofenton y métodos electroquímicos que promueven la mineralización total.

La electrocoagulación constituye una alternativa distinta desde el punto de vista económico así como también medioambiental para el tratamiento de residuos industriales, comerciales y municipales, cuyos costos de operación son menores que la coagulación química (Russell, 2012).

Cortazar Martínez, Coronel Olivares, Escalante Lozada, & González Ramírez, (2013), han demostrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos. La toxicidad de colorantes se ha evaluado utilizando diversos bioindicadores como *Daphnia magna*, *Salmonella thyphimurium* y peces. Además, se han realizado ensayos en ratas e incluso se ha hecho monitoreos biológicos a trabajadores de la industria textil.

Hasta la fecha, se han aplicado procesos de neutralización al inicio de los tratamientos de efluentes con colorantes con el objeto de conseguir una precipitación química al añadir un reactivo muy común como la cal viva (CaO). Esta cal neutraliza el exceso de acidez y precipita algunos de los colorantes de tipo aniónico. Luego se procede a realizar una coagulación floculación mediante reactivos como: sulfato de aluminio, cloruro férrico, hidróxido férrico e hidróxido de aluminio; los cuales, además de eliminar colorantes aniónicos, remueven la materia coloidal presente en el efluente. La oxidación con hipoclorito de sodio es una técnica muy empleada y que resulta económica, pero se ha demostrado que puede generar compuestos

organoclorados, los cuales son cancerígenos que resultan aún más tóxicos y más difíciles de biodegradar que los colorantes.

En los últimos años se han ensayado diversas tecnologías para el tratamiento de este tipo de efluentes. No obstante, muy pocas de ellas han sido aplicadas a escala industrial, debido al alto costo implicado en su uso. Esta situación, sin embargo, deberá cambiar a medida que la protección al ambiente se vuelva más relevante y, por ende, aumenten las restricciones legales al vertido de sustancias contaminantes. Entre las últimas tecnologías utilizadas comercialmente esta la coagulación con compuestos catiónicos poliméricos, y la filtración con membranas o utilizando osmosis inversa; además de los métodos de oxidación, ya sea con ozono o a través de procesos de oxidación avanzada. Y los métodos electroquímicos, que son los propuestos en esta investigación (Colindres, 2010).

2.3.3.1. Colorantes

Los colorantes (o materiales para teñir) suele ser compuestos orgánicos que sirven para dar color a diversas sustancias, entre otras las siguientes: fibras animales, vegetales o sintéticas y productos similares (tales como lana, seda, algodón, lino, rayón, nailon, papel, cuero o pieles), u otros materiales (como aceites, ceras, caucho o plásticos) (Kirk, Othmer, & Scott, 1962, pág. 131).

El color es un aspecto de gran importancia a nivel comercial, se ofrece ropa con todo tipo de colores y tonos, incluso las comidas están decoradas con colores, así como también las medicinas, por lo que gran cantidad de investigaciones están orientadas a obtener nuevos colorantes, en la actualidad hay más de diez mil tintes disponibles comercialmente (Zollinger, 1978).

Se conocen alrededor de 100000 colorantes comerciales y más de 700 000 toneladas métricas se producen anualmente, de las cuales, 35 000-70 000 se

descargan en las aguas residuales (Catellar, Angulo, Zambrano, & Charris, 2013).

Los colorantes pueden ser productos naturales, extraídos de plantas y animales o bien de síntesis industrial mediante una reacción química a gran escala. Los colorantes sintéticos comenzaron a producirse en el siglo XIX. El primero de ellos fue el denominado "negro de anilina", motivo por el cual todavía algunos se refieren a los colorantes sintéticos como "las anilinas" (Textil, 2012) .

Por otro lado a partir de derivados del petróleo se obtienen los colorantes sintéticos con características superiores a la de los colorantes naturales, en lo referente a las propiedades físico-químicas así como, también por las ventajas funcionales en relación a su aplicación luego del teñido. Estos colorantes presentan resistencia a la degradación (Textil, 2012).

Los colorantes textiles pueden contener en su composición sustancias tóxicas, así como los efluentes de la industria textil tienen efectos tóxicos y pueden ser carcinogénicos, mutagénicos o teratogénicos en varios organismos (Barreda-Reyes, Ortega-López, Ortega-Regules, Santiago-Santiago, & Netzahuatl-Muñoz, 2015). Por lo tanto, el tratamiento de efluentes industriales que contienen colorantes y sus metabolitos es necesario para su descarga final sin contaminantes al medio ambiente.

Los pigmentos textiles se definen en forma sencilla como colorantes insolubles. Por esta razón su aspecto físico a temperatura ambiente es el de un polvo coloreado, generalmente, finamente dividido. La diferencia entre los pigmentos y los colorantes, es que los primeros son sólidos a temperatura ambiente e insoluble en agua. Por sus características de insolubilidad, los pigmentos son empleados para ser depositados sobre el sustrato textil y adheridos a él por medio de un ligante, en la técnica de estampación (Textil, 2012).



Figura 9. Colorantes.

Fuente. Foto, Elvia Moreno Posadas/Archivo CIENCIA UNAM

Los cromóforos son uno de los grupos de átomos responsables del color, entre los cuales los más comunes son los azo ($-N=N-$), carbonilo ($C=O$), metilo ($-CH_3$), nitro y grupos quinoides. En la Figura 9 se muestran ejemplos de algunos colorantes que presentan estos grupos cromóforos. Los colorantes también pueden contener otros grupos que incrementan la intensidad del color y que pueden ser de tipo reactivo, ácidos, directos, básicos, dispersos, aniónicos, sulfuros, entre otros (Cortazar Martínez, y otros, 2012) .

Una sustancia colorante tiene por lo menos dos grupos presentes en su molécula: el grupo cromóforo y el grupo auxocromo. A los compuestos que contienen un grupo cromóforo se denomina cromógeno. Algunos grupos de átomos que presentan uno o más enlaces insaturados y que su presencia es la responsable de generar el color al compuesto, se los denomina cromóforos.

Los colorantes azo son colorantes orgánicos que se usan en muchas aplicaciones, como la tinción de telas, muchos de ellos son derivados del compuesto orgánico azo benceno, $C_{12}H_{10}N_2$ (Brown, LeMay, Bursten, & Burdge, 2004, pág. 361). Son los más consumidos en este sector. Aproximadamente corresponden al 70% de los colorantes empleados actualmente para teñir materiales textiles, de piel, cosméticos y alimentos. Estos colorantes son compuestos químicos caracterizados por la presencia de uno ó mas grupos azo ($-N=N-$). Se consideran compuestos xenobióticos

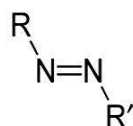
recalcitrantes a los procesos biodegradativos, debido a su alta estabilidad a la luz y al ataque microbiano (Qayyum, 2006). Son resistentes a la biodegradación aerobia en procesos convencionales y bajo condiciones anaerobias se lleva a cabo la reducción del colorante originando subproductos conocidos como metabolitos (aminas aromáticas), algunas altamente carcinogénicas que presentan graves problemas de toxicidad ocasionando una severa contaminación de ríos y agua subterránea (Moeller Chávez, 2000)

(Cortazar Martínez, Coronel Olivares, Escalante Lozada, & González Ramírez, 2013), ha demostrado que ciertos colorantes azo pueden ser carcinogénicos y mutagénicos, además de que sus productos de degradación pueden resultar más tóxicos. La toxicidad de colorantes se ha evaluado utilizando diversos bioindicadores como *Daphnia magna*, *Salmonella thyphimurium* y peces. Además, se han realizado ensayos en ratas e incluso se ha hecho monitoreos biológicos a trabajadores de la industria textil.

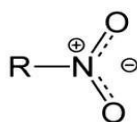
Los colorantes nitro, son compuestos aromáticos o heterocíclicos que contienen un grupo cromóforo nitro ($-\text{NO}_2$) en orto o para con respecto a un grupo auxocromo, el cual es ordinariamente un hidroxilo o un amino aril-sustituido. El grupo nitro es cromóforo mucho mas débil que el grupo nitroso (Kirk, Othmer, & Scott, 1962, pág. 377)

A continuación se muestran como ejemplos al grupo azo y al grupo nitro.

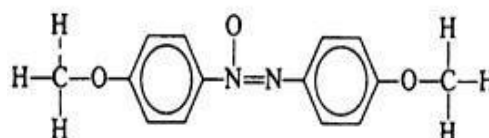
GRUPO AZO [$-\text{N}=\text{N}-$]



GRUPO NITRO [$-\text{NO}_2$]



GRUPO AZOXI [$-\text{N}_2\text{O}-$]



Los colorantes inorgánicos se denominan colorantes térreos o minerales y se obtienen por vía natural (minas) o artificial (síntesis química). Son compuestos metálicos de diferente color (por ejemplo, ocre, rojo de óxido de hierro, amarillo de cromo, azul de ultramar, azul cobalto, etc.). Se caracterizan por

ser insolubles en agua, y reciben la denominación de pigmentos. En la tintura de textiles, los pigmentos se utilizan de forma muy limitada debido a su insolubilidad en agua, pero se emplean ampliamente por la técnica de estampación Serigráfica (Textil, 2012).

Los colorantes orgánicos se los encuentra en forma de pigmento o de colorantes. Su forma de obtención natural ha sido casi completamente desplazada por la fabricación por síntesis química. Los colorantes y pigmentos sintéticos, como productos de reacción del enorme sector de la química orgánica, constituyen el grupo de los productos coloreados más utilizados en la industria textil. Mientras que en la química de los colorantes se suele establecer una división de los colorantes y pigmentos de acuerdo con su constitución, es decir, según el grupo funcional al que pertenezcan (por ejemplo; azoicos, de trifenilmetano, de antraquinona, de oxazina), en la práctica es mucho más útil el criterio de clasificación basado en las propiedades técnicas y funcionales (Textil, 2012).

No se dispone de ningún colorante ideal, que satisfaga sobre todos los materiales, cualquier exigencia de aplicación y solidez al uso. Esto significa que los colorantes sólo aportan una cantidad de virtudes limitadas, es decir algunos sólo tiñen las fibras celulósicas, mientras otros son aptos para teñir fibras proteicas o para fibras sintéticas. Aparte de ello, sus características de solidez pueden ser muy variables entre las distintas familias. Esto explica la gran cantidad de colorantes y pigmentos existentes en el mercado. Es por eso que se hizo necesario que exista un compendio de todos los colorantes existentes clasificados e identificados individualmente mediante una convención de alcance internacional, por lo que apareció el color index el mismo que se edita en el Reino Unido por la Society of Dyers and Colourists y en USA, la American Association of Textile Chemists and Colourists. Cada colorante posee un nombre genérico y un número de clasificación. El nombre genérico es un código que contiene tres elementos: familia de colorante, color y un número de identificación. A continuación un ejemplo: CI Vat Blue 1. de CI: color index , Vat: colorantes a la tina (familia) Blue: azul (color), 1 número identificación (Textil, 2012).

A continuación en la Tabla 1, se muestra la clasificación de los principales colorantes textiles y en la Tabla 2 se especifican las diferentes combinaciones con su grado de fijación de colorante/fibra.

Tabla 1. Clasificación de los colorantes textiles.

Clasificación Química	Clasificación de Uso o Tintórea Azoicos
Antraquinónicos	Ácidos
Heterocíclicos	Básicos
Indigoides	Dispersos
Derivados de ftalocianina	Reactivos
Polimsetínico	A la cuba
Estilbénicos	Sulfurosos
Sulfurosos	Azoicos sobre fibra
Trifenilmetánicos	Pigmentos

Fuente. Industrial Dyes, Chemistry, Properties, Application, (Wiley, 2003).

Tabla 2. Grado de fijación para diferentes combinaciones colorante/fibra.

Clase de colorante	Fijación típica %	Sustrato
Ácido	80- 93	lana, nylon
Básico	97-98	acrílico
Directo	70-95	celulosa
Disperso	80-92	sintéticas
Premetalizados	95-98	lana
Reactivos	50-80	celulosa
Sulfurosos	60-70	celulosa
A la cuba	80-95	celulosa

Fuente. Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Application; (Wiley, 2003)

El efluente de las industrias textiles lleva un gran número de tintes y otros aditivos que se añaden durante el proceso de coloración (Wang, Yediler, Linert, Wang, & Kettrup, 2002). Estos son difíciles de eliminar en

procedimientos convencionales de tratamiento de agua y se pueden transportar fácilmente a través del agua especialmente porque están diseñados para tener alta solubilidad.

Tipos de Colorantes

Colorantes Ácidos

Presentan una afinidad con las fibras proteínicas y son las más empleadas en el teñido de la lana. La mayoría no agotará sobre fibras celulósicas, pero debido a que se asemejan a los tintes directos en cuanto a su composición química. Hay un grupo de ellos que tiñe de celulosa bastante bien. También resultan afines con las fibras de poliamina.

Estos colorantes se unen a las fibras por puentes de hidrógeno, fuerzas de Van der Waals y enlaces iónicos. Su estructura química es compleja pero tiene largas cadenas aromáticas, con grupos aminos o sulfónicos que los hacen solubles en agua.

La mayoría pueden ser de los siguientes tipos:

- Antraquinónicos
- Azos
- Trifenilémánicos

Son de naturaleza aniónica y su aplicación ocurre en baños fuertemente ácidos a neutros (Lockuán, 2012).

Colorantes Básicos

Son generalmente hidroclouros de sales o bases orgánicas. Los cromóforos se encuentran en el catión, por lo cual se suele llamarlos tintes catiónicos. Debido a su baja solidez a la luz, éstos fueron prácticamente descontinuados hasta que se descubrió que servían para teñir fibras acrílicas. En la práctica, las fibras celulósicas no son afines con los tintes básicos. Los tintes pueden aplicarse a la celulosa si las fibras son mordentadas antes del teñido; sin embargo rara vez se aplican estos tintes al algodón. En el caso de la fibra de

proteína, existe evidencia de que su afinidad es de naturaleza química (Lockuán, 2012).

Colorantes Directos

Son solubles en agua y se unen al algodón por atracción química (puentes de Hidrógeno y fuerzas de Van der Waals). Existe afinidad del hidrógeno de la molécula del colorante a los grupos hidroxilo de la celulosa. Después de que el colorante se disuelve en el agua, se añade sal para controlar el porcentaje de absorción del colorante por la fibra. No son tan caros y están disponibles en una gran variedad de tonos (Lockuán, 2012).

La clasificación según SDC (Society of Dyers and Colourists)

- Clase A: Colorantes autoigualables a causa de una buena migración del colorante a la fibra. Aun cuando el teñido inicial parezca mal igualado, el colorante es capaz de redistribuirse a medida que avanza la operación de teñido. No requieren ningún producto para corregir su buena igualación.
- Clase B: Colorantes que no son autoigualables. Tienen escaso poder migratorio y deben ser aplicados con cuidado, pues es difícil corregir la mala igualación inicial. Se controlan mediante adiciones de sal, ésta se agrega gradualmente comenzando con cantidades pequeñas que se van incrementando a cada adición.
- Clase C: Colorantes de muy escaso poder migratorio. No igualan con adiciones sistemáticas de sal, siendo necesario además un control estricto de la temperatura. Son los colorantes que ofrecen las mayores dificultades en el teñido. Como regla general, al realizar bicromías y tricomías, deben trabajarse colorantes de la misma clase, y a lo sumo, de clases contiguas (mezcla de A y B o de B y C, mas no de A y C).

La casificación según la cantidad de carbonato presente en el baño

- Colorantes que tiñen en baño neutro
- Colorantes que tiñen en baño débilmente ácido
- Colorantes que tiñen en baño alcalino (Lockuán, 2012).

Colorantes Reactivos

Los colorantes reactivos se adhieren a la fibra de celulosa formando una fuerte liga química (enlace covalente). Estos colorantes fueron desarrollados en los años cincuenta como un proceso económico para lograr una solidez al color aceptable en fibras celulósicas (Lockuán, 2012).

Generalmente se componen de dos elementos fundamentales:

- **Parte cromófora:** Determina principalmente el matiz del colorante. Los diferentes matices de la gama de los colorantes reactivos se consiguen con la presencia de diversos grupos cromóforos. Aquí aparecen, además, los grupos solubilizantes ($-\text{SO}_3\text{Na}$) que le confieren solubilidad en medio acuoso y los sustituyentes que le confieren sustantividad a las fibras celulósicas.
- **Parte auxócroma (reactiva):** Es responsable, en primer lugar del tipo y velocidad de reacción entre la fibra celulósica y el colorante (Lockuán, 2012).

Existen diversas maneras de clasificar a los colorantes reactivos:

- Según su nivel de reactividad
 - Colorantes de baja reactividad (aplicados en caliente a 80–98°C para lograr su fijación)
 - Colorantes de reactividad media (se fijan a 60°C)
 - Colorantes de alta reactividad (necesitan temperaturas más bajas, de 30 – 50°C para fijarse)
- Según el compuesto que forman con la celulosa
 - Colorantes que forman ésteres de celulosa
 - Colorantes que forman éteres de celulosa (Lockuán, 2012).

Colorantes a la Tina

Son colorantes que tienen entre sí diferente constitución química pero todos son insolubles en agua. Por su reducción en un medio alcalino se transforman en leucoderivados hidrosolubles. El proceso de reducción se fundamenta en la acción reductora del hidrógeno sobre el grupo carbonilo, transfiriéndolo al grupo alcohólico. En este estado se aplica sobre el sustrato y luego se le oxida para insolubilizarlo nuevamente, pero esta vez ya dentro de la fibra. Existen

dos grandes grupos: los derivados del índigo y los derivados de la antraquinona (Lockuán, 2012).

Colorantes al Azufre (Sulfurosos)

Reciben este nombre porque en su molécula está presente el azufre. Su proceso es parecido al de los colorantes tina; tiñen las fibras en estado reducido y se oxidan para volverse insolubles. Al igual que los colorantes tina, también son insolubles en agua pero solubles en medio alcalino y en presencia de sulfuro de sodio como agente reductor. Se usan para lograr un negro muy oscuro a bajo costo. Para evitar que desprendan ácido sulfúrico durante su almacenamiento, se trata el sustrato con acetato sódico, sin lavado posterior, y se seca (Lockuán, 2012).

Colorantes Naftoles

La esencia del teñido con estos colorantes consiste en tratar el sustrato con disoluciones alcalinas de las anilidas de ácidos fenolcarboxílicos que han de actuar como componentes copulables a fin de que las fibras los fijen para ser transformadas posteriormente (sobre la misma fibra) en el verdadero colorante mediante el tratamiento con una disolución de sal de diazonio.

Los colorantes naftol están disponibles en colores brillantes a bajo costo, pero sus requisitos de aplicación limitan su uso. Se utilizan para el teñido de fibras celulósicas cuando se requiere que su solidez al agua y su brillantez sean comparativamente buenas a un costo razonable. Ofrecen resultados satisfactorios especialmente en el espectro del amarillo, anaranjado y rojo. Se les ha aplicado a fibras de proteínas, pero se pueden obtener resultados igualmente buenos con tintes ácidos mediante métodos más simples (Lockuán, 2012).

Colorantes Dispersos

Surgieron de la necesidad de encontrar una manera fácil y satisfactoria para teñir el acetato. Son suspensiones de compuestos orgánicos finamente divididos con muy baja solubilidad. Las fibras hidrofóbicas, como el acetato de celulosa (secundaria o terciaria) y las fibras sintéticas con frecuencia se teñirán mejor con tintes insolubles que con aquellos que se disuelven en agua.

Un baño de teñido con colorantes dispersos contiene al colorante en tres estados: colorante en solución, colorante en miscelas y colorante sólido. Sólo el colorante en solución es absorbido por la fibra. El colorante disperso se fija en la fibra mediante fuerzas físicas o llamadas fuerzas de Van der Waals, ya que no poseen iones o cargas eléctricas (Lockuán, 2012).

Colorantes Pre-Metalizados

Fueron desarrollados para poder teñir directamente la lana sin necesidad de recurrir al mordentado en una etapa de tratamiento posterior. Se aplican con mayor rapidez, son fáciles de combinar y en algunos colores tienen más brillo que los colorantes mordentables. La molécula del colorante es una estructura típica monoazo, conteniendo grupos adicionales hidroxilos, carboxilos o aminos, capaces de formar complejos con metales de transición como el cromo, cobalto, níquel y cobre (Lockuán, 2012).

La clasificación de los colorantes pre-metalizados está basada según el número de moléculas de colorante que forman complejo con el ión metálico, pueden ser:

- **Pre-metalizados 1:1.** Donde una molécula de colorante forma complejo con un ión de metal.
- **Pre-metalizados 2:1.** Donde dos moléculas de colorante forman complejo con un ión metálico (Lockuán, 2012).

Colorante de la Investigación realizada

Nombre del colorante utilizado en la investigación azul mno reactivo en combinación con vinil sulfónico conocido comercialmente como azul reactivo 250, mencionado en la Tabla 3 y Figura 10.

Tabla 3. Características químicas del Colorante Reactivo Azul Marino (mno)

Fórmula
Tetrasodium 4-amino-5-hydroxy-6-[[2-methoxy-5-[[2-(sulphonatooxy)ethyl]sulphonyl]phenyl]azo]-3-[[4-[[2-(sulphonatooxy)ethyl]sulphonyl]phenyl]azo]naphthalene-2,7-disulphonate
Estructura molecular
<p>Fórmula molecular: $C_{27}H_{23}N_5Na_4O_{20}S_6$</p> <p>Peso molecular 1021.8421</p> <p>Número de registro 93951-21-4</p> <p>CAS No.: 93951-21-4.</p> <p>EINECS No.: 300-644-5 Textil química. Tipo: Colorantes reactivos ... etiqueta: Reactiva azul 250 100% colorantes textiles y productos químicos</p>

Fuente. http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB4904557.htm

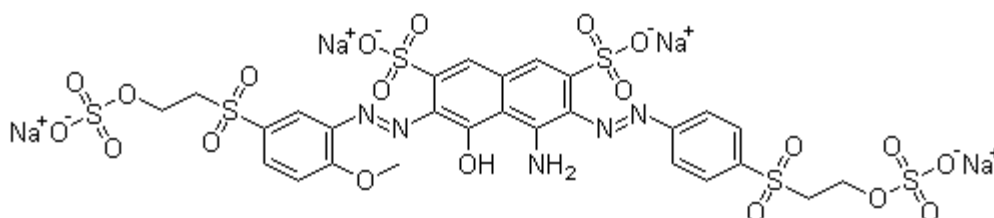


Figura 10. Estructura molecular de Colorante Reactivo Azul

Fuente. http://www.chemicalbook.com/ChemicalProductProperty_EN_CB4904557.htm

2.4. Marco Conceptual

(M.Ambiente, 2012), (Ramalho, 2014) y (Ebbing & Gammon, 2009) presentan algunas definiciones que se consideran a continuación:

Adsorción en carbón activado:

Es una operación unitaria que se realiza sobre una superficie de un sólido adsorbente mediante la acumulación de una sustancia en una fase líquida o gaseosa (absorbible o absorbato). Una capa de moléculas de soluto se acumula sobre la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales.

Ánodo:

Electrodo en el que tiene lugar la oxidación.

Anión:

Ión con carga negativa.

Agua residual:

Las aguas de composición variada provenientes de las descargas de usos municipales, industriales, comerciales, de servicios agrícolas, pecuarios, domésticos, incluyendo fraccionamientos y en general de cualquier otro uso, que hayan sufrido degradación en su calidad original.

Agua residual industrial:

Agua de desecho generada en las operaciones o procesos.

Amperio:

Unidad de intensidad de corriente eléctrica. Un amperio es una corriente constante que manteniéndose en dos conductores paralelos, rectilíneos, de longitud infinita, de sección circular despreciable y situados a una distancia de un metro uno de otro en el vacío, produciría una fuerza igual a $2 \cdot 10^{-7}$ newton por metro de longitud.

Auxocromo:

Son grupos o radicales positivos de átomos, que intensifican la acción de un grupo de átomos no saturados que, estando presentes en una molécula de una sustancia química, hacen que esta sea coloreada.

Caracterización de un agua residual:

Proceso destinado al conocimiento integral de las características estadísticamente confiables del agua residual, integrado por la toma de muestra, medición de caudal e identificación de los componentes físico, químico, biológico y microbiológico.

Cátodo:

Electrodo en el que ocurre la reducción.

Catión:

Ión con carga positiva.

Cuerpo receptor o cuerpo de agua:

Es todo río, lago, laguna, aguas subterráneas, cauce, depósito de agua, corriente, zona marina, estuario, que sea susceptible de recibir directa o susceptible de recibir directa o indirectamente la descarga de aguas residuales.

Carga contaminante:

Cantidad de un contaminante aportada en una descarga de aguas residuales, o presente en un cuerpo receptor expresada en unidades de masa por unidad de tiempo.

Carga máxima permisible:

Es el límite de carga de un parámetro que puede ser aceptado en la descarga a un cuerpo receptor o a un sistema de alcantarillado. Industriales.

Celda electrolítica:

Celda electroquímica en la que una corriente eléctrica lleva a cabo una reacción que de otra forma no sería espontánea.

Celda electroquímica:

Sistema que consiste en electrodos que se sumergen en un electrolito en el que una reacción química usa o genera una corriente eléctrica.

Coagulantes:

Partículas líquidas en suspensión que se unen y forman partículas con mayor volumen.

Conductividad:

La cantidad de electricidad que el agua puede conducir, expresada en magnitudes químicas. Unidades $\mu\text{Siemens}/\text{cm}^2$

Contaminantes:

Un compuesto que a concentración suficientemente alta causa daño en la vida de los organismos y no son encontrados de forma natural sino que son provocados.

Color:

Es el color que forma en agua la cual posee la materia suspendida y disuelta. Unidades Pt/Co

Coloides:

Es un sistema físico-químico que forma dos fases una continua y otra dispersa una fluida y la otra en forma de partículas que son sólidas esta se encuentra en menor proporción.

Coagulación:

Proceso de desestabilización de las partículas coloidales mediante coagulantes. Comienza en el mismo instante en el que se agregan los coagulantes al agua y dura solamente fracciones de segundo. Básicamente consiste en una serie de reacciones físicas y químicas, ente los coagulantes, la superficie de las partículas, la alcalinidad del agua y el agua misma.

Compuesto inorgánico:

Compuestos conformados por elementos distintos al carbón. A unos compuestos sencillos de carbono, incluyendo el monóxido de carbono, dióxido de carbono, carbonato y cianuros, se les suele considerar inorgánicos.

Compuesto orgánico:

Compuestos que contienen carbono combinado con otros elementos como hidrógeno, oxígeno y nitrógeno.

Compuestos refractarios:

Los compuestos químicos refractarios o recalcitrantes son compuestos resistentes a la biodegradación.

Cromóforo:

Grupos funcionales de la molécula responsables de la absorción. Principalmente son: dobles y triples enlaces carbono-carbono, sistemas aromáticos, grupo carbonilo, imino ($C=N$), diazo ($N=N$), nitro y enlaces C-Y (Y es un átomo con pares libres).

Culombio o coulomb (símbolo C):

Unidad de carga eléctrica, un culombio es la cantidad de electricidad transportada en un segundo por una corriente de un amperio de intensidad.

$$C = A \cdot s = F \cdot V$$

Demanda bioquímica de oxígeno:

Demanda bioquímica o biológica de oxígeno que se ejerce por 5 días, el oxígeno consumido por un residuo debido a la acción bacteriana, generalmente entre el 45 y 55 por 100 de la Demanda Teórica de Oxígeno (DTO).

Demanda química de oxígeno:

Método de oxidación química de la materia orgánica de una muestra susceptible de oxidar al dicromato de potasio o al permanganato en medio ácido.

Descarga:

Acción de verter, infiltrar, depositar o inyectar aguas residuales a un cuerpo receptor, o a un sistema de alcantarillado en forma continua, intermitente o fortuita.

Depuración:

Es la remoción de sustancias contaminantes de las aguas residuales para disminuir su impacto ambiental.

Efluente:

Líquido proveniente de un proceso de tratamiento, proceso productivo o de una actividad.

Electrocoagulación:

Es un proceso complejo con un número de mecanismos, que operan sinérgicamente, para remover los contaminantes del agua residual, presenta dos puntos centrales: el mecanismo de reacción y la configuración del reactor.

Electrolito:

Sustancia como el cloruro de sodio, que se disuelve en agua para dar una disolución conductora de electricidad.

Electrón:

Partícula con carga negativa muy ligera que existen en la región alrededor del núcleo cargado positivamente de un átomo.

Electro-Fenton:

Oxidación avanzada del cual se producen radicales altamente reactivos del hidroxilo ($\text{OH}\cdot$)

Faradio

Unidad de capacidad eléctrica, un faradio es la capacidad de un conductor con una diferencia de potencial de un voltio tiene como resultado una carga estática de un culombio.

$$F = \frac{A \cdot s}{V} = \frac{C}{V} = \frac{C^2}{J} = \frac{C^2}{N \cdot m} = \frac{s^2 C^2}{m^2 kg} = \frac{s^4 A^2}{m^2 kg}$$

Fuerza electromotriz:

Llamada también diferencia de potencial eléctrico por unidad de carga, y se mide en voltios.

Hertzio:

O Hertz, es una unidad de frecuencia que significa “1 ciclo por segundo” o en otras palabras “la oscilación que describe una partícula durante un período de un segundo”.

Ohmio:

Unidad de resistencia eléctrica, un ohmio es la resistencia eléctrica que existe entre dos puntos de un conductor cuando una diferencia de potencial constante de 1 voltio aplicado entre dos puntos produce, en dicho conductor, una corriente de intensidad de un amperio, cuando haya fuerza electromotriz en el conductor.

$$\Omega = \frac{V}{A} = \frac{m^2 kg}{s^3 A^2}$$

Polución o contaminación del agua:

Es la presencia en el agua de contaminantes en concentraciones y permanencia superiores o inferiores a las establecidas en la legislación vigente capaz de deteriorar la calidad del agua.

Protón:

Partícula que se encuentra en el núcleo del átomo; tiene una carga de igual magnitud pero opuesta en signo a la del electrón y una masa 1836 veces mayor que la del electrón.

Tratamiento convencional:

Es aquel que está conformado por tratamiento primario y secundario, incluye desinfección.

Tratamiento avanzado para efluentes:

Es el tratamiento adicional necesario para remover sustancias suspendidas y disueltas que permanecen después del tratamiento convencional para efluentes.

Turbiedad:

Falta de transparencia de un líquido, debido a la presencia de partículas en suspensión. Cuando más sólidos en suspensión haya en el líquido, generalmente se hace referencia al agua, más sucia parecerá ésta y más alta ser la turbidez. Unidades NTU.

Vatio:

Es la potencia que da lugar a una producción de energía igual a 1 joule por segundo. En términos eléctricos, un vatio es la potencia producida por una diferencia de potencial de 1 voltio y una corriente eléctrica de 1 amperio.

$$W = \frac{J}{s} = V \cdot A = \frac{m^2 kg}{s^3}$$

Voltio:

Es la diferencia de potencial eléctrico necesaria para impartir un joule de energía a una carga de un coulomb, o la diferencia de potencial a lo largo de un conductor cuando una corriente con una intensidad de un amperio utiliza un vatio de potencia.

$$V = \frac{J}{C} = \frac{m^2 kg}{s^3 * A}$$

Xenobiótico:

Compuestos que disponen de una estructura química que no existe en la naturaleza, sino que ha sido desarrollada por el hombre en un laboratorio.

2.5. Marco Legal

Tomando en consideración, el Art. 86 de la Constitución Política de la República del Ecuador declara de interés público a la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y el patrimonio genético del país, a la recuperación de espacios naturales degradados, al establecimiento de un Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas que garanticen la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecológicos.

En relación a la normativa ambiental utilizada se aplicó el Texto Unificado de la Legislación Ambiental Ecuatoriana hasta el 13 de febrero del 2015 que el Ministerio del Ambiente realizó cambios en el texto y se publicó el acuerdo Ministerial 097A el que sustituye al Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria. Además con fecha 4 de Noviembre del 2015 se publicó una Reforma Ministerial que también hace cambios al texto.

2.6. Hipótesis y Variables

2.6.1. Hipótesis General

Mediante las técnicas de electrocoagulación, y adsorción con carbón activado, se mejorará la composición de las aguas residuales provenientes de la industria textil, mediante porcentajes significativos de remoción, reduciendo la contaminación ambiental y el consumo de agua en la ciudad de Guayaquil - Ecuador.

2.6.2. Hipótesis Específicas

- El pH, DOQ, color, SST características del agua residual sintética de industria textil, alteran la calidad del agua de cuerpos hídricos.
- La aplicación de la técnica de electrocoagulación incrementa los niveles de remoción de los colorantes refractarios en la industria textil,

reduciendo la contaminación ambiental y el consumo de agua en la ciudad de Guayaquil - Ecuador.

- La aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de la electrocoagulación, permite obtener significativamente efluentes con parámetros de calidad para su reutilización o descarga, reduciendo la contaminación ambiental y el consumo de agua en la ciudad de Guayaquil - Ecuador.

2.6.3. Identificación de Variables

Variable independiente: Técnicas de electrocoagulación y adsorción aplicados para reducir el colorante refractario Azul mno en aguas residuales, corresponden a las variables de las condiciones de operación de los sistemas de electrocoagulación y de adsorción.

Variable dependiente: Remoción del colorante refractario mno en el agua residual sintética, variable que se va a manipular en este caso en los dos equipos durante las experimentaciones.

2.6.4. Operacionalización de Variables

Aplicando la escala de medición del proceso de electrocoagulación se obtienen las variables pH, intensidad de corriente eléctrica y tiempo que controlan las condiciones de operación de esta investigación son independientes, objetivas unidimensionales, cuantitativo, pertenecen a un tipo numérico a la escala de intervalos, los valores finales tienen dos atributos de orden y distancia. Son continuas por que se presentan en números enteros o fracciones y siempre hay un valor intermedio entre dos atributos.

En lo referente a la operación del sistema de adsorción se controlan las variables como: temperatura, capacidad de adsorción altura de relleno, estas variables independientes, corresponde al tipo numérico, Cuantitativo, y

Continúa. Es decir estas variables son manipuladas durante las experimentaciones. Los parámetros correspondientes al control de las aguas residuales sintéticas son pH, Color, DQO, constituyen variables dependientes cuyo tipo de escala es Numérica, Cuantitativa, Continua, Objetiva unidimensional, en el tipo de Escala de medida está el intervalo para el pH y los demás parámetros son de razón que no tienen valores negativos y su origen real.

En la parte informática, las herramientas tecnológicas para evaluar las variables dependientes e independientes y realizar estadísticas para evaluar los estudios realizados en el proyecto fueron Minitab versión 17, Microsoft Excel.

Tabla 4. Operacionalización de variables

VARIABLES	CONCEPTO	INDICADOR	CLASIFICACIÓN	ESCALA	UNIDAD	POR SU NATURALEZA	MEDICIÓN
Técnicas de electrocoagulación y adsorción	Electrocoagulación se define como un proceso en el cual las partículas que se encuentran suspendidas o disueltas en un medio acuoso son desestabilizadas, induciendo corriente eléctrica en el agua a través de placas metálicas paralelas de diversos materiales, siendo el hierro y el aluminio los más utilizados. Adsorción es la retención, adhesión o concentración en la superficie de un sólido de sustancias	pH, Densidad de corriente, Tiempo T Profundidad de relleno. Capacidad de adsorción	Independiente	De intervalo Razón Razón Intervalo Razón Razón	A/m ² min °C cm mg/g	Numérica Multidimensional continuo Numérico Cuantitativo continuo	4500H. Standard Métodos Cronómetro 0'-15 min Termómetro 0-100°C Flexómetro 0-100 cm
Remoción de colorante de aguas residuales	Eliminación de colorantes refractario mediante técnicas electrocoagulación y adsorción	Color DQO	Dependiente	Razón Razón	Pt/Co mg/l	Cuantitativo continuo	8025 HACH 5220D Standard Métodos

Fuente. Elaboración propia

CAPÍTULO III: METODOLOGÍA

3.1. Tipo y Diseño de Investigación.

Esta investigación aplicada pertenece al campo de la Contaminación Ambiental, teniendo como área específica la físico química, con aplicación de la electroquímica y la adsorción. La línea de investigación es la remoción de colorante refractario en muestras sintéticas de efluentes industriales.

Diseño de Investigación

Muestra cruda. t=0min	Muestra en proceso t=2min	Muestra al final t=4min
O ₁	X	O ₂

En cuanto al alcance, la investigación fue planificada y comparativa; mientras que, en relación al diseño, fue experimental y transversal (Figura 11)

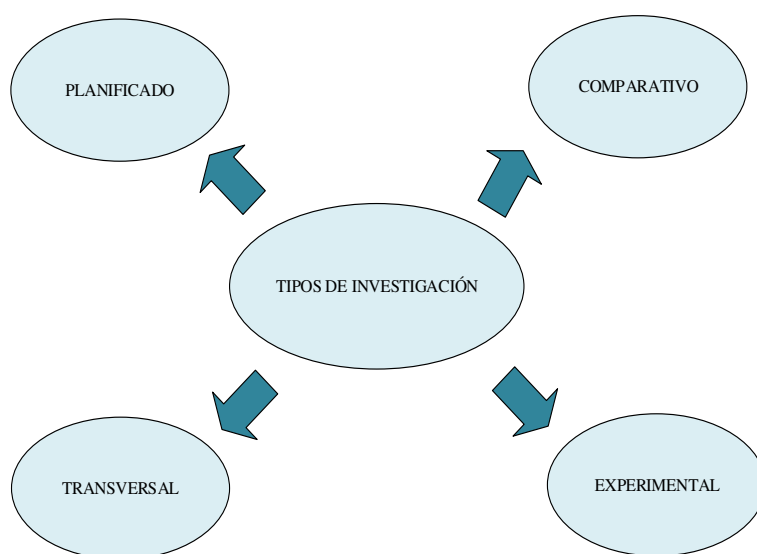


Figura 11. Tipo y diseño de investigación
Fuente. Elaboración propia.

Planificado: se realizó una planificación de la toma de datos en cada una de las corridas en los equipos y las experimentaciones

Comparativo: se comparó los datos antes y después de las aplicaciones de los equipos de electrocoagulación y de adsorción. Lo que facilitó la comparación entre las dos técnicas.

Experimental: hubo manipulación de las variables independientes. Se midieron los efectos de las variables independientes sobre la variable dependiente.

Transversal: se tomaron muestras en un período de tiempo determinado.

Las experimentaciones se realizaron con una muestra sintética de efluente de textil a diferentes condiciones de operación en celdas de electrocoagulación seguida de adsorción. Se experimentó el efecto sobre las variables dependientes por la acción o manipulación de las variables independientes. Para lo cual se planificó la toma de datos primarios que tienen como objetivo su evaluación.

De acuerdo a los niveles de investigación este proyecto reúne condiciones metodológicas de: descriptivo, relacional, explicativo y aplicativo. Figura 12.

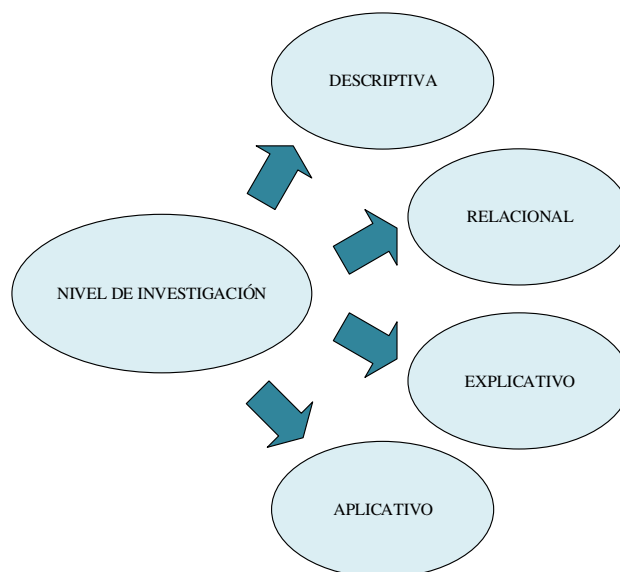


Figura 12. Niveles de investigación
Fuente. Elaboración propia

Descriptiva: se seleccionó las características principales de la investigación y se realizó una descripción detallada de los contaminantes del agua residual industrial y de los métodos de depuración a aplicar.

Relacional: se estudió la relación entre las variables de estudio DQO y color.

Explicativa: se explicó el comportamiento de una variable en función de otra. Se estudió causa efecto y su control, en esta se descarta asociaciones aleatorias.

Aplicativa: se planteó resolver un problema en la que se enmarca innovación técnica industrial, se evaluaron los procesos tecnológicos de electrocoagulación y adsorción.

Las experimentaciones se efectuaron en el Laboratorio de Aguas y Planta Piloto de la Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil. La investigación tomó más de dos años con planificación de la pruebas en equipo de electrocoagulación y de adsorción, con la realización de análisis de control al inicio y al final de cada experimentación. La unidad de análisis corresponde a las concentraciones de los compuestos refractarios antes y después de las

corridas experimentales. Los muestreos se realizaron en cada etapa de las experimentaciones.

Dentro de la unidad de observación se tiene los parámetros de control del sistema de electrocoagulación y Adsorción como: pH, intensidad eléctrica, conductividad, tiempo, color y DQO.

En las unidades se trabajó con variaciones en los sistemas de operación, las mismas que ocurrieron frente a estímulos que correspondieron a los cambios de las condiciones de operación del equipo de electrocoagulación y adsorción. Se efectuaron medidas luego de los cambios, las mismas que reflejaran los efectos de la intervención.

El propósito del estudio fue determinar la técnica más eficiente para eliminar los colorantes refractarios derivados del azul mno de aguas residuales de la industria textil mediante la aplicación de tecnologías avanzadas como electrocoagulación y adsorción, realizando comparaciones estadísticas de los métodos para lo cual se aplicó herramientas informáticas como Minitab versión 17, Excel.

3.2. Unidad de Análisis

La unidad de estudio fueron los colorantes compuestos refractarios a remover y DQO, que se encuentran en agua residual sintética y que corresponde a la unidad de información.

3.3. Población de Estudio

Las aguas residuales textiles sintéticas elaborada en base a formulación adaptada de (M.J.Lavorante, 2011) y de una industria textil de la ciudad de Guayaquil., para tela de algodón. Se ha partido del hecho que el estudio esta direccionado hacia el colorante utilizado en este tipo de industrias.

3.4. Tamaño de Muestra

Se prepararon tanque de 220 litros muestra estándar según protocolo, para cada corrida en línea. Se utilizó 100 litros de agua residual sintética para operación en continuo y, para proceso en lote o batch 3 litros.

3.5. Selección de Muestra

Conociendo que las descargas de las industrias textiles presentan diferentes tipos de desechos colorantes se procedió a muestrear tres fabricas con similares características y se elaboró una muestra compuesta a fin de tener una muestra homogénea con parámetros como color, DQO, turbiedad, pH entre otros, que sirvieron de base para elaborar el agua residual sintética con una concentración de colorantes que simulan a las aguas residuales reales.

A continuación, la caracterización del agua residual sintética que se empleó para las diferentes experimentaciones con el equipo de electrocoagulación y el de adsorción con carbón activado. Se realizó en base a la caracterización de una agua residual real.

Tabla 5. Parámetros para caracterización de muestra sintética de efluente textil.

Parámetro	Expresado como	Unidad	Límites máximos Permisibles(a)
Potencial de Hidrógeno	pH		6-9
Temperatura	T	°C	Condición natural ± 3
Color real		Pt/Co	Inapreciable en dilución 1/20
Demanda Química de oxígeno	DQO	mg/l	200
Demanda Bioquímica de Oxígeno(5 días)	DBO ₅	mg/l	100
Sólidos suspendidos	SS	mg/l	130
Sulfatos	SO ₄ ⁼²	mg/l	1000
Sulfuro	S ⁼²	mg/l	0.5
Aceites y grasas	Solubles en hexano	mg/l	30
Compuestos fenólicos	fenol	mg/l	0.2
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0.5
Cadmio	Cd	mg/l	0.02
Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0.5
Hierro	Fe	mg/l	10

Fuente. Elaboración propia. (a) Acuerdo Ministerial 097, 04/11/2015

3.6. Técnicas de Recolección de Datos

La técnica de recolección de datos es el Método Experimental por lo cual permite manipular variables y ver sus efectos mediante el proceso, debido a que se puede comparar resultados y encontrar el más óptimo mediante el estudio del mismo, además se diseña un esquema para controlar las variables en el experimento.

3.6.1. Proceso de experimentación

Luego de realizar la caracterización del agua residual sintética se efectuaron diferentes pruebas experimentales por triplicado en lotes, lo que permitió

determinar los valores óptimos de amperaje y voltaje y el tiempo de reacción del tratamiento. Se tomaron muestras antes y después de cada corrida, para realizar los análisis aplicando el Estándar Métodos para análisis de aguas y aguas residuales industriales y domésticas edición 22 (2012). Los resultados se recopilaron en una matriz utilizando el programa Excel.

Los resultados obtenidos de la experimentación en lote sirvió para realizar las corridas en continuo.

3.6.2. Técnica de Control de Variables

En el proceso en lote, el control se basa en mantener *constancia en las condiciones* que significa mantener valores fijos que alteren nuestras variables en éste caso sería el amperaje en las configuraciones establecidas (Ramos, Catena, & Trujillo, 2004).

Tabla 6. Control de Constancia de Condiciones para el experimento.

Configuración Celda X Paquete					
3 x 2		3 x 3		4 x 2	
Amperio	Voltio	Amperio	Voltio	Amperio	Voltio
5	9	5	6	5	10
10	13	10	8	10	20
15	18	15	16	15	24

Fuente. Elaboración propia.

En el proceso en continuo, el control es aplicado mediante el *Balanceo de Variables*, el cual indica mantener el equilibrio de variables extrañas establecidas (Ramos, Catena, & Trujillo, 2004), en el experimento se identificó como el caudal de operación, para lo cual se colocó un sistema de bypass después de la bomba de alimentación para poder regular dicho caudal que alimenta el sistema de electrocoagulación, sedimentación y adsorción, que opera a 1.3 litros/min, llenando el compartimiento en 4 minutos que es el tiempo de reacción, haciéndolo en un tiempo de 10 minutos hasta lograr la separación de contaminantes de manera óptima.

3.6.2. Diagramas del Experimento

Mediante el Diagrama de Flujo se puede observar la forma como fue realizado el proceso del experimento en batch y continuo.

A) Proceso en Lote o Batch



B) Proceso en Continuo

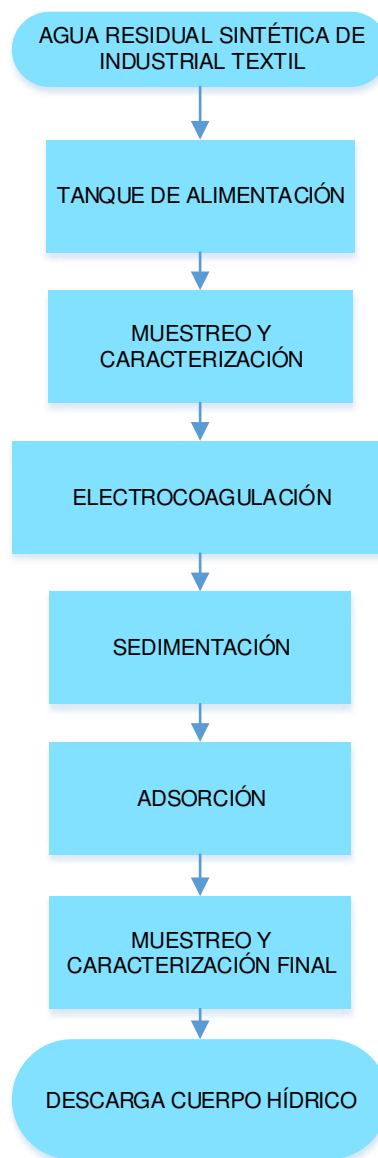


Figura 13. Diagrama de Flujo de Proceso en Lote o batch y Continuo.
Fuente. Elaboración propia.

3.7. Análisis e interpretación de la Información.

Se trató el agua residual sintética mediante el método de electrocoagulación para lo cual se empleó el diseño experimental que se basó en la variación de

la intensidad de corriente entre 5, 10 y 15 A, la configuración de las celdas electroquímicas y a tiempos de 2 y 4 min.

Las variables de respuesta fueron % de remoción de DQO y color.

3.8. Materiales y Métodos

3.8.1 Equipos, materiales y reactivos

- Equipo de electrocoagulación con electrodos de hierro, consta de las siguientes partes: fuente de poder, cámara de electrocoagulación, cámara de sedimentación, sistema de adsorción (filtro de carbón activado), tanques de alimentación y de agua tratada, bomba de alimentación. Mostradas en las Figuras 14 – 16.

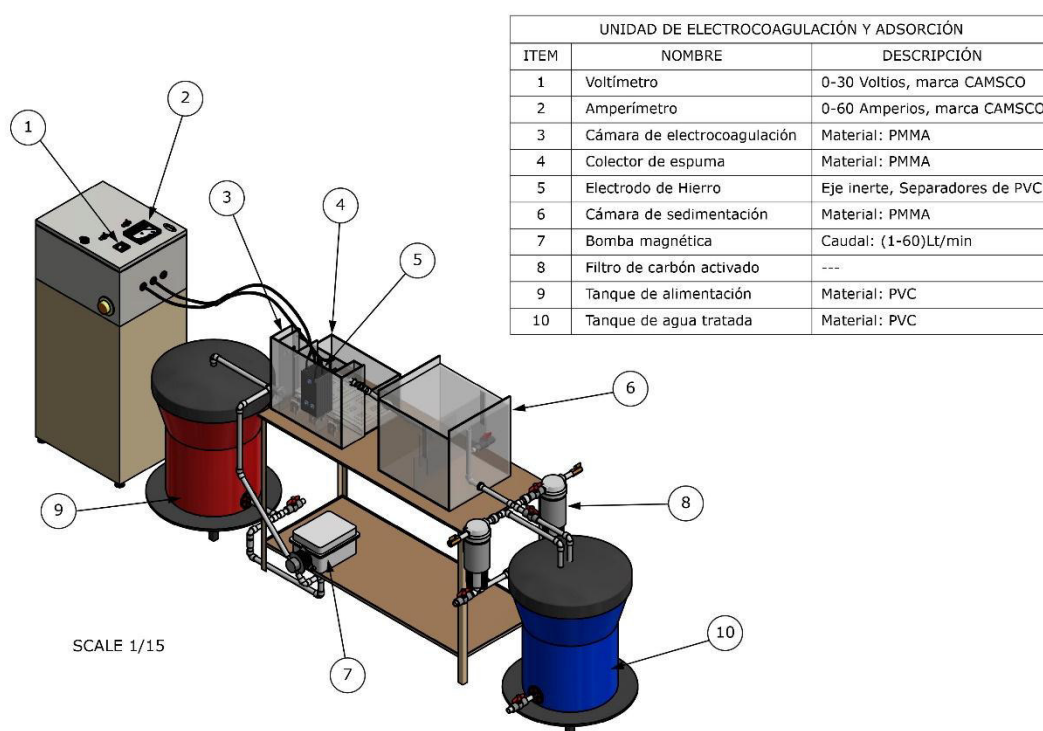


Figura 14. Esquema de un sistema de tratamiento de agua residual. Vista isométrica I.

Fuente. Elaboración propia

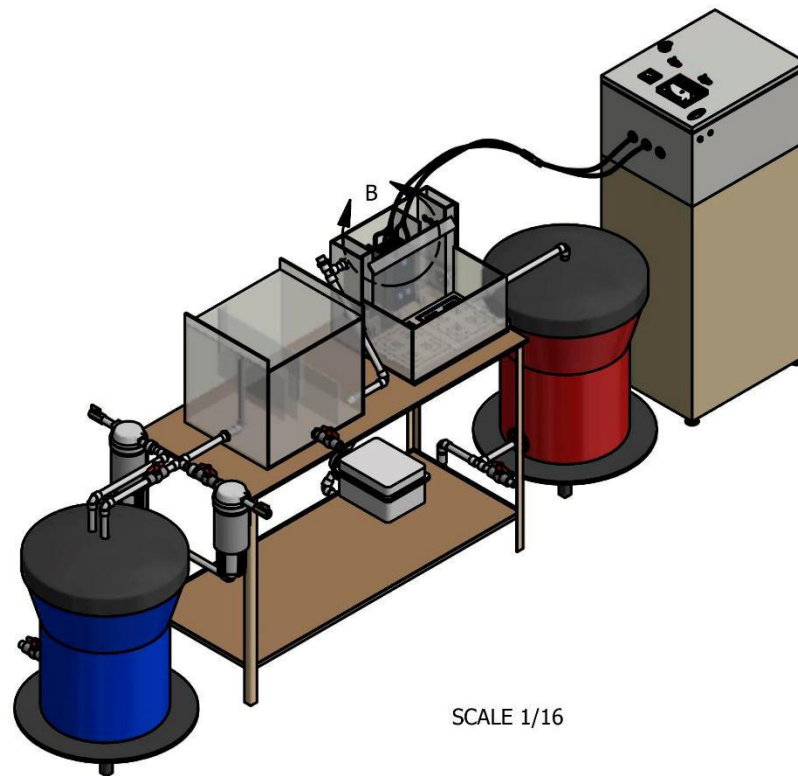


Figura 15. Esquema de un sistema de tratamiento de agua residual. Vista isométrica II.

Fuente. Elaboración propia.

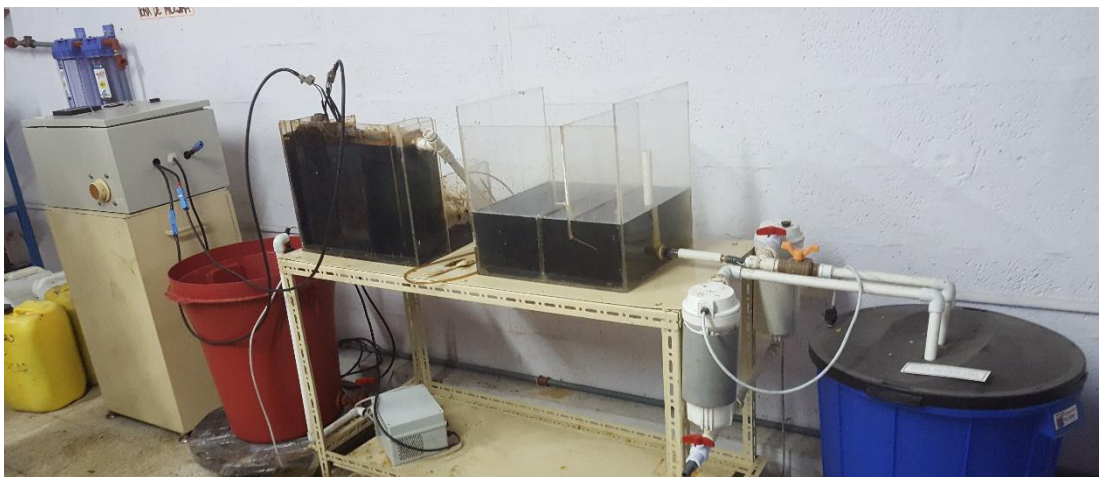


Figura 16. Sistema de tratamiento de agua residual.

Fuente. Elaboración propia

3.8.1.1 Fuente de Poder

Fuente de poder que trabaja con corriente alterna con entrada de 110 voltios, 60 hertzios, con salida de 0 a 30 voltios, con la finalidad de transformar la corriente alterna en corriente continua (Figura 17 - 19).

Amperímetro Marca CAMSCO: De 0 a 60 amperios

Voltímetro Marca CAMSCO: De 0 a 30 voltios

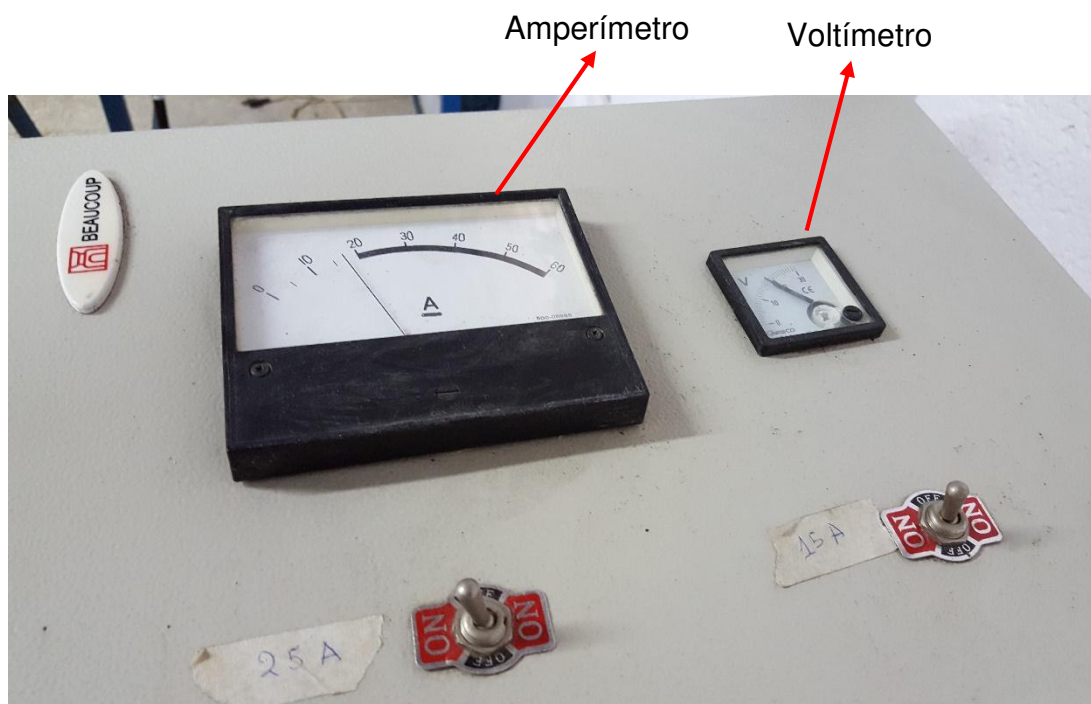


Figura 17. Fuente de Poder
Fuente. Elaboración propia



Figura 18. Fuente de poder. Vista lateral.
Fuente. Elaboración propia



Figura 19. Fuente de poder. Perilla de regulación de amperaje.

Fuente. Elaboración propia

3.8.1.2 Paquetes de electrodos

El material que se utilizó para llevar a cabo este proyecto fue una celda electroquímica a escala piloto, para tal efecto se usó electrodos de hierro con las configuraciones de tres celdas dos paquetes, tres celdas tres paquetes y cuatro celdas dos paquetes, así como también se determinaron los valores ideales de parámetros como voltaje y amperaje. Las celdas de electrocoagulación se elaboraron de acuerdo al espacio de la cámara donde se efectuó la electrocoagulación donde se registraron las siguientes medidas.



Figura 20: Paquete de electrodo de hierro.

Fuente. Elaboración propia

Las dimensiones del paquete de electrodo de Hierro son las siguientes:

- Longitud de la celda 20.5 cm
- Espesor de cada placas 2.5 mm
- Espesor de separador de cada placa 4 mm

Las configuraciones de las celdas se calcularon con en base a las dimensiones del paquete de electrodo.

Número celdas = número de placas - 1

3.8.1.3 Acrílico

Polímero de Metil Metacrilato(PMMA)

Termoplástico rígido excepcionalmente transparente en estado natural es incoloro, inerte a muchas sustancias corrosivas.

Fórmula Química: MMA Monómero metacrilato, $C_5O_2H_8$

PMMA($C_5O_2H_8$)_n

n = número de moléculas de MMA que forma parte de la cadena lineal PMMA

3.8.1.4 Cámara de Electrocoagulación

Está construida con el material acrílico con la medidas indicadas en el apartado 3.8.2 *Diseño y Construcción*.

Contiene dentro los electrodos de hierro anteriormente mencionados en el apartado 3.8.1.2 *Paquetes de Electrodos*. (Figura 21)



Figura 21: Equipo de electrocoagulación.

Fuente. Elaboración propia.

Adicionalmente el equipo de electrocoagulación cuenta con un colector de espuma del mismo material de la cámara de electrocoagulación, el cual permite separar los lodos generados durante el proceso de electrocoagulación. Las medidas están detalladas en el apartado *3.8.2 Diseño y Construcción*.

3.8.1.5 Cámara de Sedimentación

Construida con el material acrílico, para que las partículas no separadas en la electrocoagulación se sedimenten. (Figura 22).



Figura 22: Equipo de sedimentación.
Fuente. Elaboración propia.

3.8.1.6 Bomba magnética

Bomba magnética Serie 507300 con caudal 1.3 L/min. Además consta de una instalación de recirculación con el fin de disminuir el caudal de ingreso del agua residual sintética a la cámara de electrocoagulación (Figura 23).



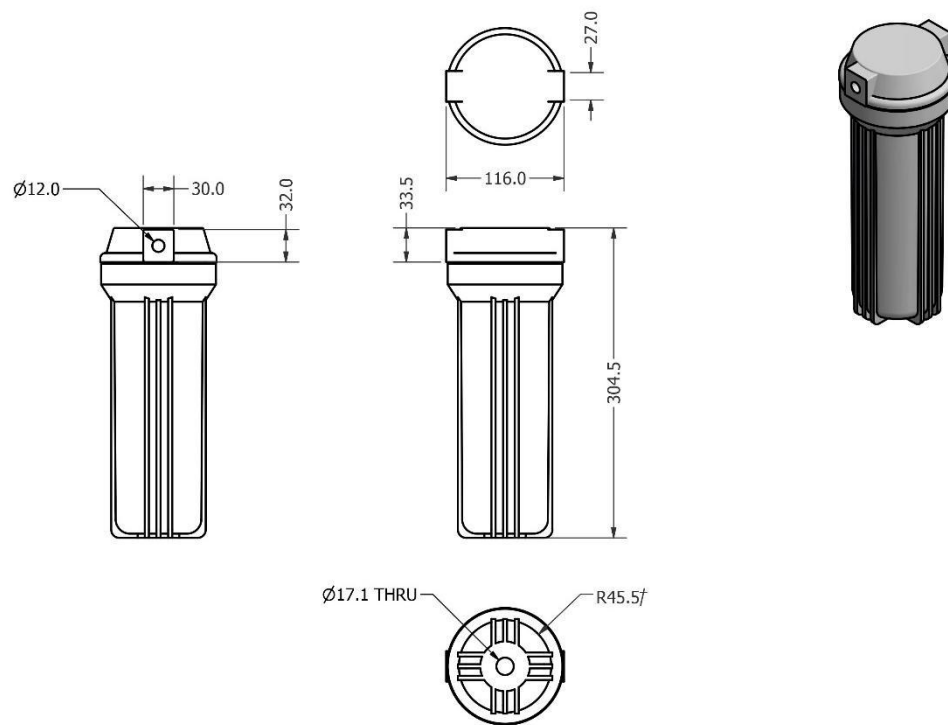
Figura 23: Bomba magnética Serie 507300
Fuente. Elaboración propia

3.8.1.7 Filtro de carbón activado

Hay dos filtros de carbón activado cuya función es realizar el acabado del proceso de depuración del agua residual sintética de 304.5x116 mm de tamaño (Figura 24 y 25).



Figura 24. Filtro de carbón activado marca Darco.
Anexo 5
Fuente. Elaboración propia



*Figura 25. Filtro de carbón activado.
Fuente. Elaboración propia.*

3.8.1.8 Tanque de alimentación y tanque de agua tratada

Dos tanques de PVC de 100 litros de capacidad cada uno; uno contiene el agua residual sintética y el otro el agua tratada que resulte de la experimentación con electrocoagulación y adsorción (Figura 26).



*Figura 26. Tanque de PVC de 100 litros de capacidad.
Fuente. Elaboración propia*

3.8.1.9 Pipeteador Manual

Ofrece un llenado y una dispensación más segura y cómoda, con vidrio y plástico. Pipetas Con una palanca sensible, el llenado y la entrega se controlan fácilmente. Pipetear con facilidad y comodidad (Boeco Germany, 2017) (Figura 27).

Características:

- Manejo fácil e incansable para personas diestros y zurdos.
- Un cono de admisión especialmente diseñado permite el uso de pipetas de 0,1 ml a 100 ml.
- La unidad de válvulas perfectamente armonizada asegura la entrada de líquidos sin esfuerzo.
- Conjunto preciso y altamente sensible del menisco.
- Un filtro de membrana hidrofóbico fácil de reemplazar protege el interior de líquidos penetrantes.
- Completamente auto lavable a 121 ° C (2 bar)



*Figura 27. Pipeteador y pipeta para extraer muestras.
Fuente. Elaboración propia.*

3.8.2 Diseño y Construcción.

3.8.2.1 Equipo de electrocoagulación

El equipo de electrocoagulación cuenta con una celda electrolítica con capacidad de 12 litros provista de un sistema de recolección de la espuma y flóculos, formados por la desestabilización de las partículas coloidales, cuyos precipitados se depositan en una cámara de recolección de lodos que se encuentra adjunta.

La celda electrolítica de la Figura 28, presenta las siguientes dimensiones: 420x365x410 mm. Cuenta con 4 compartimientos internos de forma rectangular donde están los electrodos y la zona de reacciones donde los flóculos se forman, miden 360x13.5x45 mm.

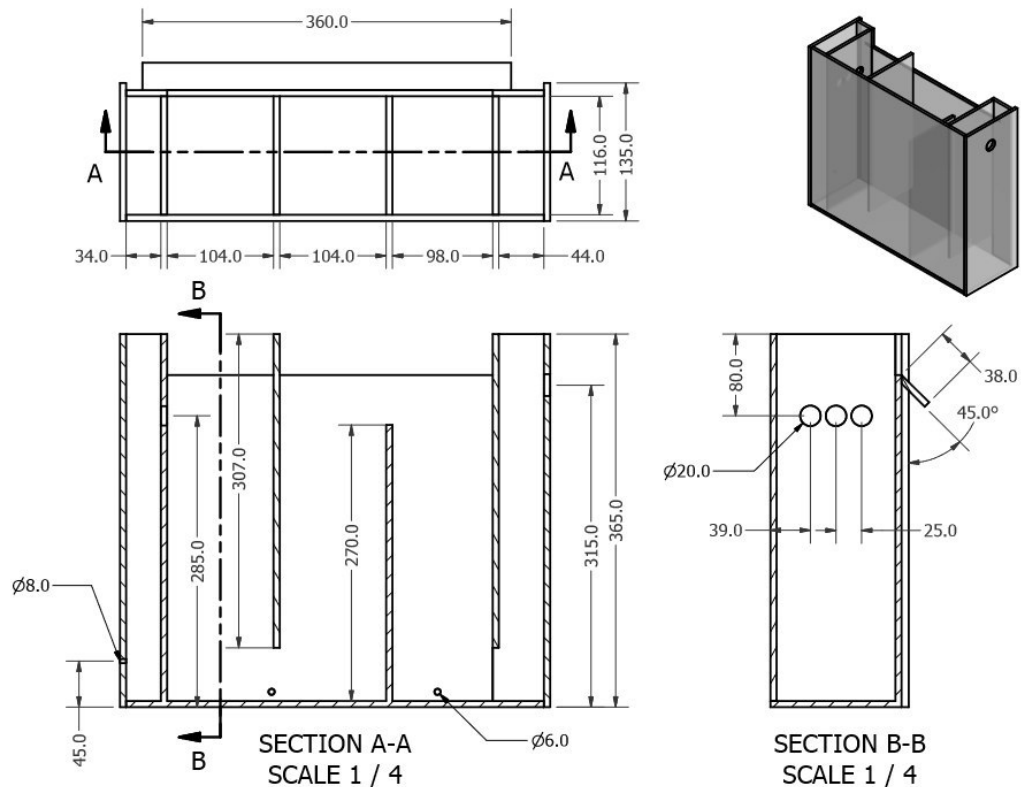


Figura 28. Celda de electrocoagulación
Fuente. Elaboración propia.

El colector de espuma o de residuos está fabricado con las siguientes medidas 408x206x226 mm (Figura 29), dentro contiene una lámina de acrílico con orificios que permite la separación de los lodos, con las medidas 392x219x6 mm. (Figura 30)

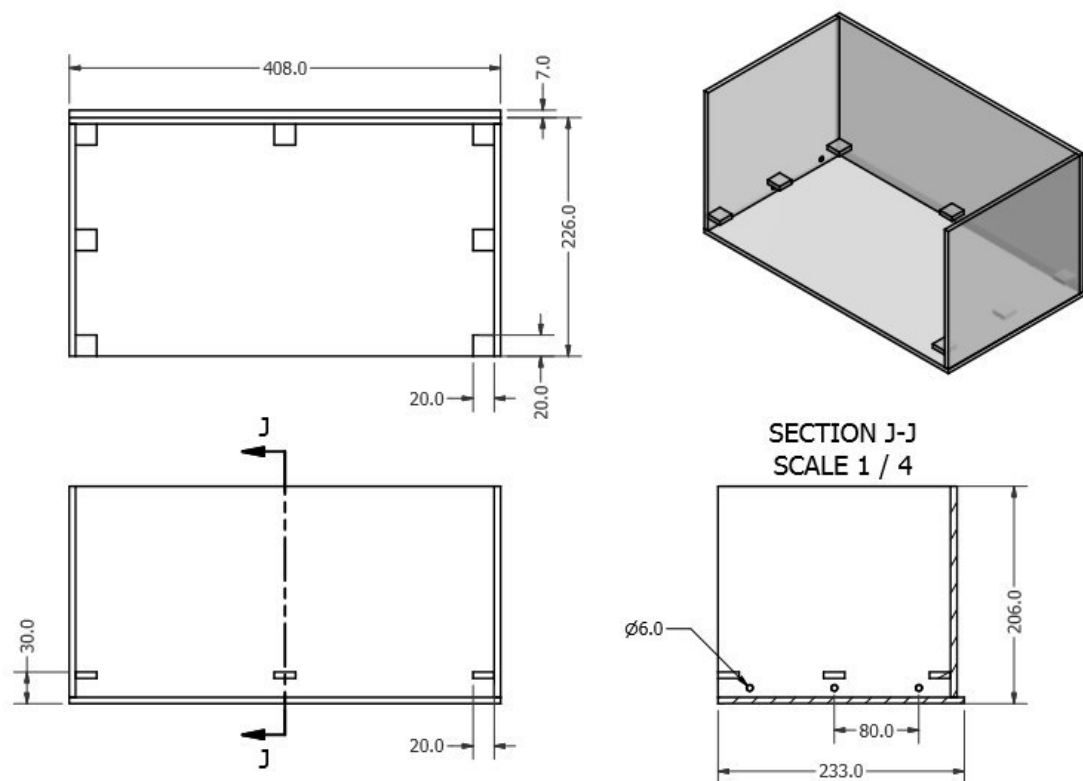


Figura 29. Colector de espuma.
Fuente. Elaboración propia.

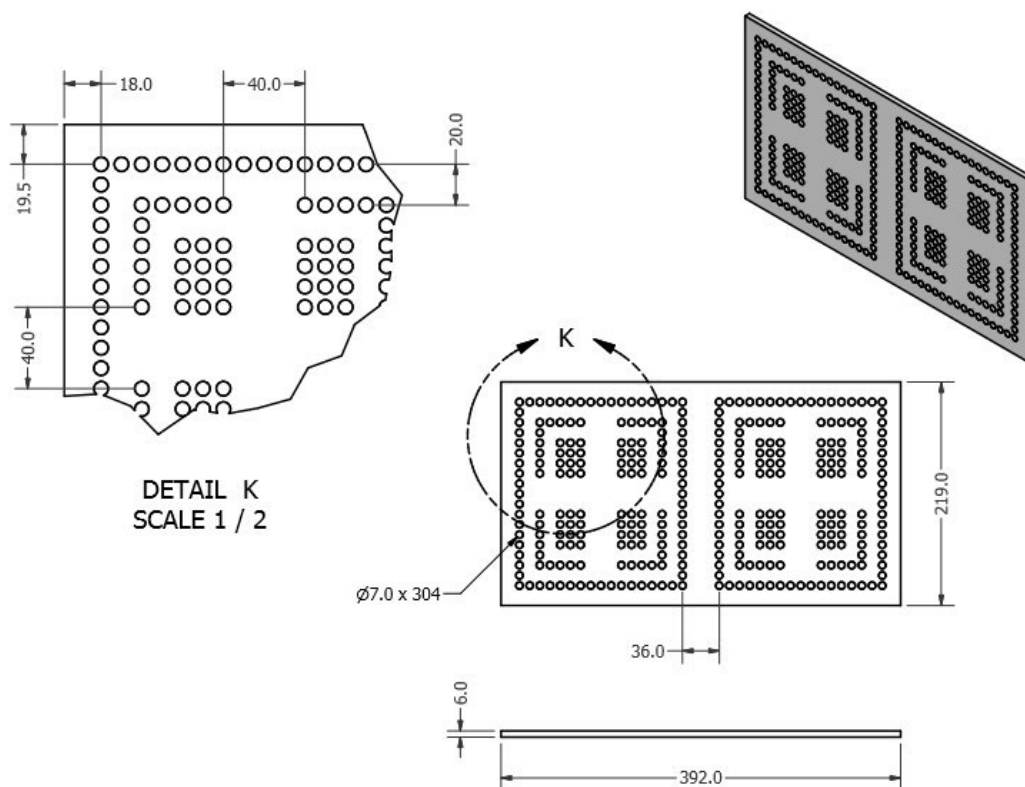


Figura 30. Lámina acrílica con orificios para separar lodos.
Fuente. Elaboración propia.

El electrodo es de hierro de forma rectangular 200 mm de largo, 100 mm de ancho y 2 mm de espesor (Figura 31). Tienen 2 eje de diámetro de 6 mm de teflón, está separado por 2 placas plásticas de 4 mm (Figura 32). El soporte del paquete es inerte.

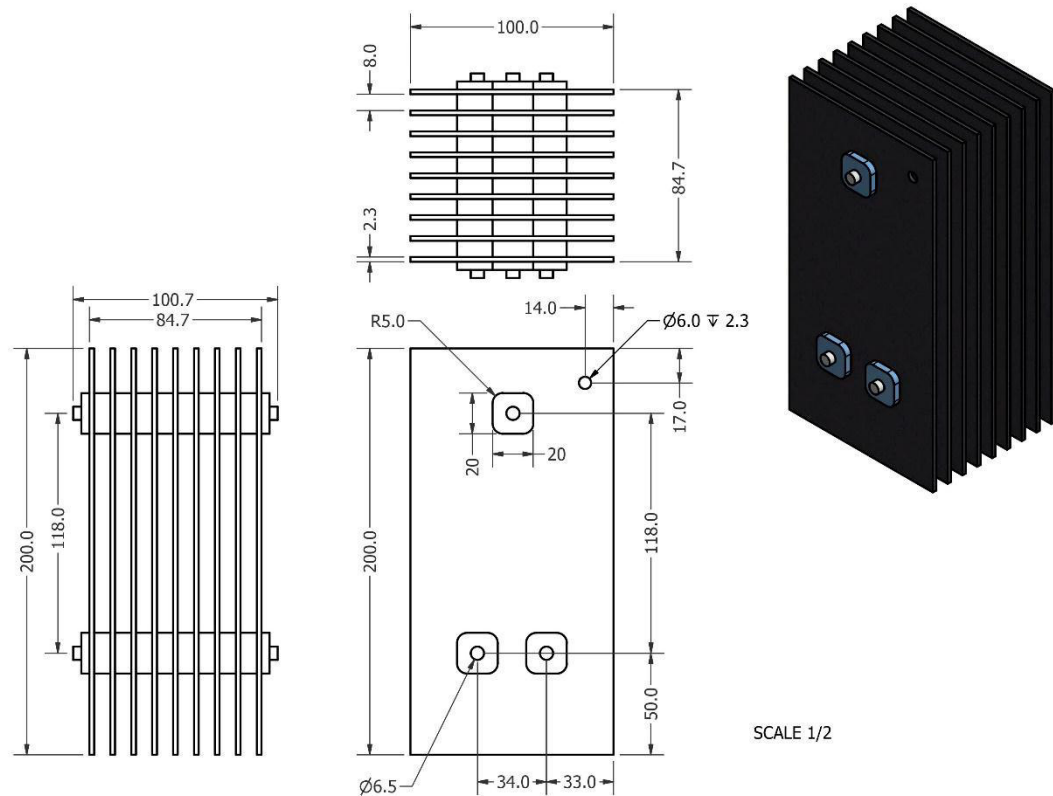
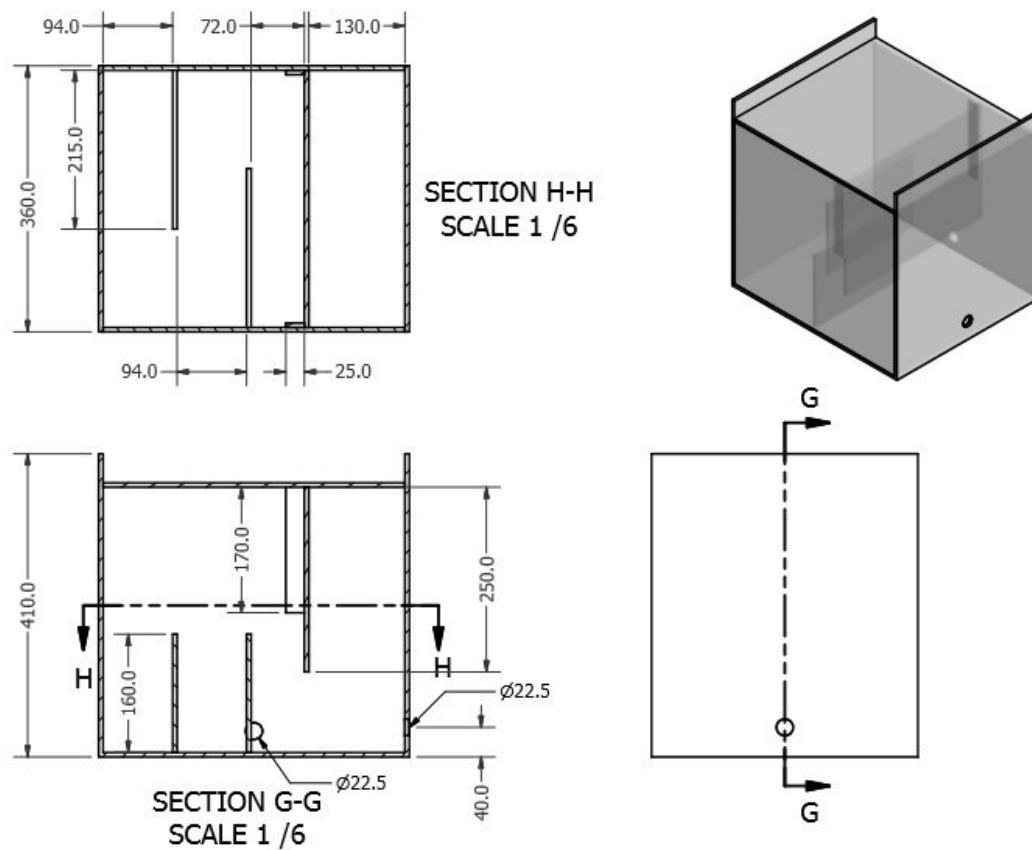


Figura 31: Electrodo de hierro
Fuente. Elaboración propia.



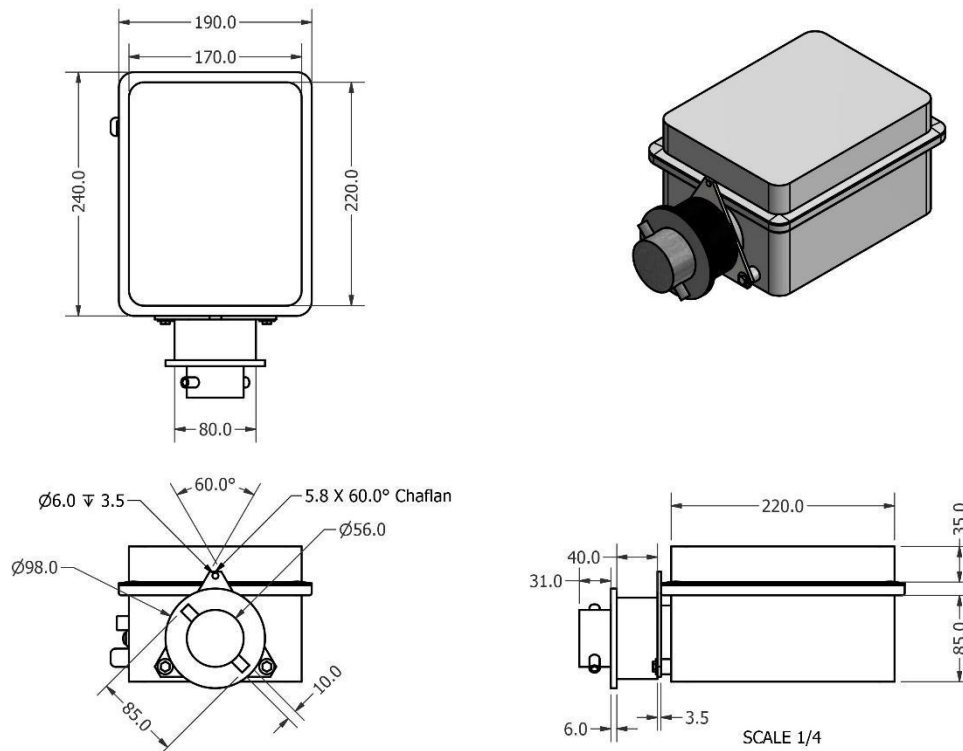
Figura 32. Placas plásticas de 4 mm.
Fuente. Elaboración propia.

El equipo de sedimentación (Figura 33), tiene una capacidad de 42 litros y tiene las siguientes dimensiones 360 x 390 x 410 mm.



*Figura 33. Cámara de sedimentación.
Fuente. Elaboración propia*

La bomba magnética de las siguiente medida 240x190 mm sirve para bombear el agua residual que contiene productos químicos por su resistencia a la corrosión. Se la utilizó para bombear el efluente sintético del tanque de alimentación hasta la cámara de electrocoagulación (Figura 34).



*Figura 34. Bomba magnética.
Fuente. Elaboración propia.*

3.8.2.2 Equipo de adsorción

El equipo de adsorción está construido por 2 recipientes de filtro de carbón activado de material pvc, que sirve para depurar el agua residual sintética, unidos por tuberías que los interconectan a cada uno respectivamente y el último filtro conectado hacia el tanque de agua tratada.

3.8.2.3 Construcción completa del equipo

Para construir el equipo todo los elementos ya previamente armados se los une comenzando con la fuente de poder y ensamblando por medio de tuberías así como se lo muestra en la Figura 35 y 36.

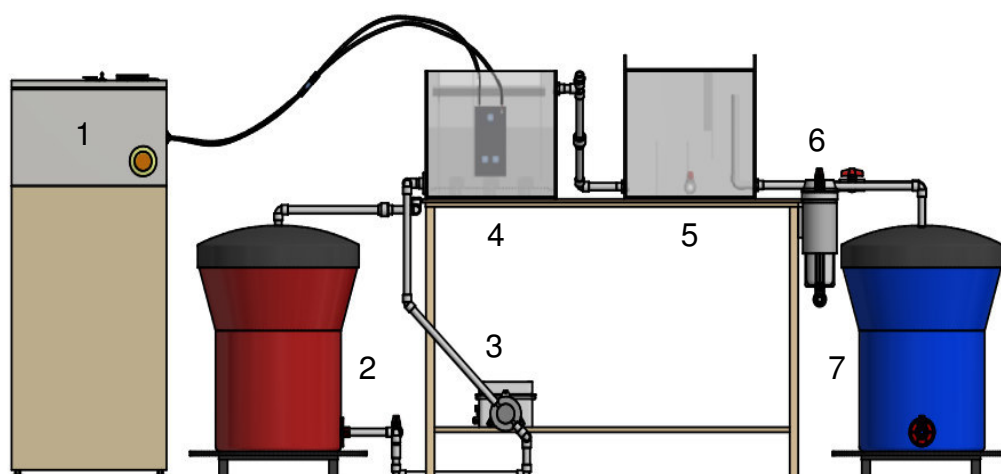


Figura 35. Esquema del sistema de Electrocoagulación armado. Vista lateral.
1. Fuente de poder; 2. Tanque de alimentación; 3. Bomba; 4. Celda electrolítica; 5. Sedimentador; 6. Filtros de carbón activado; 7. Tanque de agua tratada.

Fuente. Elaboración propia

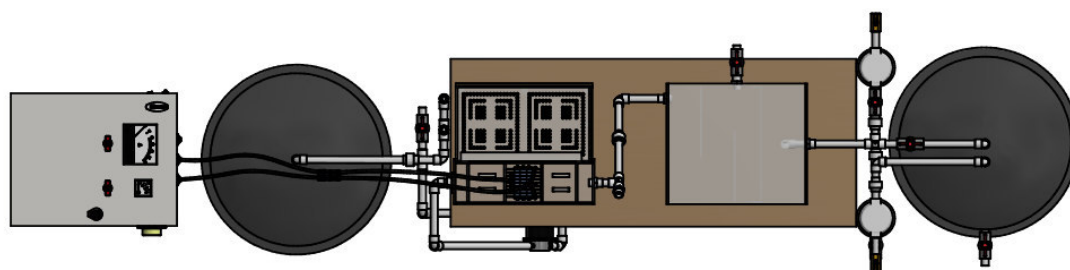


Figura 36. Esquema del sistema de Electrocoagulación armado. Vista arriba.
Figura. Elaboración propia.

A continuación en la Figura 37 se encuentran los equipos que se utilizaron para la caracterización del agua residual y de la muestra sintética.







	<p>EQUIPO DE MULTI PARÁMETRO</p> <p>Marca: HACH Modelo: 40Hd Rango para pH: 0 – 14</p>
	<p>ESPECTROFOTÓMETRO</p> <p>Marca: HACH Modelo: DR 6000 UV Rango de Longitud de onda: 190 – 1100 nm</p>
	<p>CONDUCTÍMETRO DE LABORATORIO</p> <p>MARCA: Thermo Orion Modelo: 162^a Rango: 0 – 500 mS/cm</p>
	<p>REACTOR PARA DQO</p> <p>Marca: HACH Modelo: Rango: 100 - 150°C</p>
	<p>DISPENSADOR PARA DQO</p> <p>Marca: Brand Tech Modelo: Dispensete III Organic Rango: 1 – 10 ml</p>
	<p>HERRAMIENTAS DE PLANTA</p>

Figura 37. Equipos de análisis de agua residual sintética y real y sus características.

Fuente. Elaboración propia.

Reactivos para caracterizar la muestra sintética y los análisis de control

- pH: Buffer de 4.01; 7.00 y 10.00
- Fenoles: Método Hach: Cloroformo, power pillow Pheno 1 y 2.
- Conductividad: Estándar de cloruro de potasio: 0.147mS/cm, 1.141mS/cm; 12.80 mS/cm; 110 mS/cm
- DQO: ácido sulfúrico concentrado, sulfato de plata, sulfato mercúrico, dicromato de potasio.
(De acuerdo al Estándar métodos edición 22)
- Buffer pH 4, 7 y 10

Reactivos para la preparación de la muestra sintética de agua residual industrial:

- Colorante: Azul mno reactivo en combinación con vinil sulfónico
- Dispersante Marvacol
- Suavizante Evosoft
- Jabonado Quimisoft
- Carbonato de sodio
- Hidróxido de sodio
- Carbonato de sodio
- Cloruro de sodio
- Agua desmineralizada
- Tela de algodón sin color

3.8.3 Preparación de muestra sintética

Para la preparación de la muestra sintética se utilizaron los reactivos descritos en la Tabla 7 y la Figura 38.

Tabla 7. Formulación de muestra sintética

PROCESO	PRODUCTO	UNIDAD	CANTIDAD	VOLUMEN
TINTURA	Agua Descalcificada		10	10
	NaCl en grano	g	500	
	NaOH	g	5	
	Na ₂ CO ₃	g	50	
	Colorante: Azul reactivo mno reactivo en combinación con vinil sulfónico	g	4.8	
	Dispersante (Marvacol)	g	0.5	
ACLARADO	Agua Descalcificada	l	30	30
JABONADO	Agua Descalcificada	l	30	30
	Amplex CA-ECO 1% (QUMISOFT)	g	10	10
SUAVISADO	Agua Descalcificada	l	20	20
	Tetranil ATH (EVOSOFT)	g	0,7	

Fuente. Formulación tomando como base M.J.Lavorante, 2011, e industria textil de la localidad.

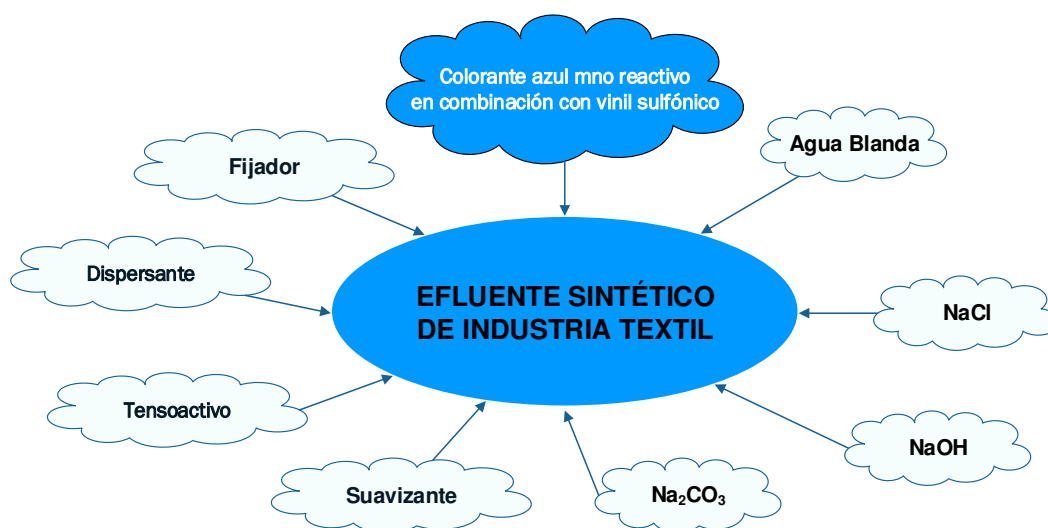


Figura 38. Constituyentes de muestra sintética.

Fuente. Elaboración propia, tomado como (Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011), industria textil de la localidad.

Para la obtención de agua residual sintética representativa se realizó una reproducción en laboratorio, de las etapas del proceso de tintura y acabados de tejidos de algodón y sus mezclas se prepararon 100 litros, de muestra sintética con reactivos de características similares a los efluentes de industria textil, de acuerdo a los procesos que se realizan en el medio. Se preparó con el asesoramiento de una importante industria textil de la localidad. La preparación se realizó, tomando como base agua descalcificada calentada a 60°C se adicionó el reactivo colorante mn azul en combinación del vinil sulfónico, luego cloruro de sodio, carbonato de sodio, e hidróxido de sodio, en base a (Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011).

(Lavorante, Álvarez, Chantrill, & Fasoli, 2011) en su artículo “Aplicaciones Ambientales de la Electrocoagulación a Escala de Planta Piloto”, para el trabajo prepara una solución de composición similar a la que se encuentra en efluentes textiles: colorante Procion Red HE-3B 0.2 %, carbonato de sodio 1.0%, hidróxido de sodio 0.5% y cloruro de sodio 0.5 %. Estas tres últimas sustancias se emplean habitualmente en el proceso de teñido como auxiliares para facilitar el fijado del colorante sobre la fibra, ensayó también el colorante textil Indanthren Brilliant Green C-FEB en igual concentración que el anterior.



*Figura 39. Preparación del agua residual sintética.
Fuente. Elaboración propia.*



*Figura 40. Muestra sintética.
Fuente. Elaboración propia.*

3.9. Diseño Experimental

Pruebas experimentales con la aplicación de tecnologías avanzadas de electrocoagulación y adsorción que remueve tanto contaminantes orgánicos como inorgánicos, teniendo en cuenta algunas consideraciones importantes para el diseño de la celda como son los electrodos, los materiales de los mismos, la geometría y la disposición de los electrodos, el cual es importante para obtener resultados óptimos.

La construcción del paquetes de electrodos se llevó a cabo por pares de láminas, que están dispuestas en parejas de dos ánodos y cátodos. Usando los principios de electroquímica, el cátodo es oxidado (pierde electrones), mientras que el agua se reduce (gana electrones), haciendo así que el agua residual sea mejor tratada (Butler, Hung, Yu-Li Yeh, & Suleiman Al Ahmad, 2011).

El agua residual sintética fue tratada mediante el método de electrocoagulación, para lo cual se empleó el diseño experimental que se basó en la variación del pH y la intensidad de corriente entre 5, 10 y 15 A. Y a tiempos de 2 y 4 minutos.

Las variables de respuesta fueron DQO y color, con el diseño experimental de 3 celdas 2 paquetes, 3 celdas 3 paquetes y 4 celdas 2 paquetes de electrodos para cada una de las experimentaciones. (Figura 41).

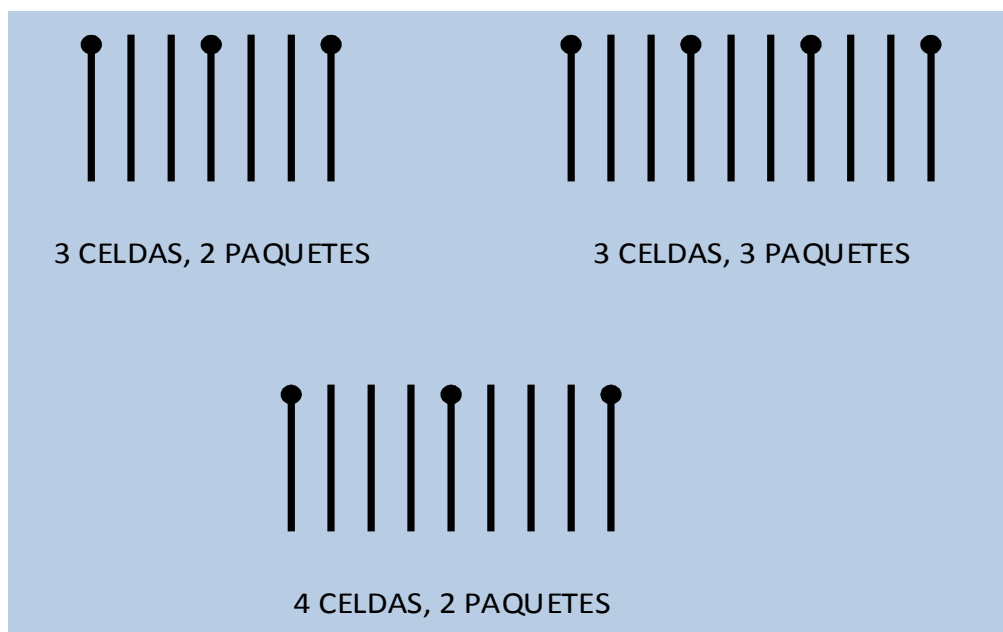


Figura 41. Configuración de electrodos.

Fuente. Elaboración propia.

Se realizaron las pruebas en lote en la celda de electrocoagulación, bombeando el agua sintética de efluente de industria textil, en el equipo de electrocoagulación el que tiene electrodo de sacrificio de hierro, se varió la intensidad de corriente y el voltaje para las cuales se midieron las remociones de DQO, color, a tiempos de 1 a 4 minutos. Los resultados permitieron determinar la eficiencia de remoción a 5, 10 y 15 Amperios de intensidad de corriente.

Una vez obtenidos resultados de la experimentación en lotes, se procedió a trabajar en continuo con las mejores condiciones de operación obtenidas en el proceso en lotes, bombeando el agua residual sintética a la cámara de electrocoagulación, que tiene como objetivo formar coagulantes por oxidación electrolítica en el ánodo, lo que produce la desestabilización de los contaminantes, partículas suspendidas y rompimiento de la emulsión, en la superficie de los electrodos, provocando que las mismas se dirijan hacia la superficie para su posterior separación. Las partículas que permanecen en el

fluido pasan a la cámara de sedimentación dónde fueron separadas por medio de la gravedad.

Después del proceso anterior comienza la otra metodología que se le aplicó para remover colorantes remanente el cual es el proceso de adsorción, donde el agua residual sintética fue bombeada dentro de los filtros que contienen el carbón activo, esta agua sale de los filtros a través de un sistema de drenaje. Luego se procede a realizar el muestreo para su respectivo análisis y obtener resultados.

Métodos de análisis.

En esta investigación se aplicaron las diferentes técnicas de análisis, al afluente, en los procesos electrocoagulación y adsorción y a los efluentes de los dos procesos. Los métodos aplicados incluyeron parámetros físicos y químicos. Se tuvo como guía el Estándar Métodos para análisis de aguas y aguas residuales, edición 22. Verificación de resultados con Laboratorio Acreditado con la norma ISO 17025 para laboratorios de ensayo. En lo referente a la caracterización del agua residual de textil, se aplicó la Guía de Monitores de la M.I Municipalidad de Guayaquil. De acuerdo a la Clasificación Internacional Industrial Uniforme (CIIU), que especifica los siguientes parámetros: pH, caudal, aceites y grasas, DBO, DQO, sólidos suspendidos totales, sólidos totales disueltos, metales pesados, compuestos fenólicos. Para determinar los máximos permisibles de descarga se utilizó el Acuerdo Ministerial 097.

Para las pruebas de electrocoagulación se construyó un equipo (Figura 45). Las experimentaciones de adsorción se realizaron en dos filtros de carbón activado.

3.9.1. Procedimiento de operación de la unidad de electrocoagulación

- **Pruebas en lote:**

- a. Se caracteriza el agua residual sintética. Figura 40.
- b. Se coloca el agua residual sintética en la cámara de electrocoagulación

- c. Se prepara el electrodo de hierro con una configuración bipolar y se lo coloca dentro de la cámara. Figura 42.
- d. Se prende la fuente y se regula para una operación con el amperaje y voltaje. definido Figura 43.
- e. Se procede a tomar una muestra de la unidad a diferentes tiempo de 2,4,....min
- f. A continuación se toma las muestras las que se las direcciona a laboratorio para análisis de color y DQO (Anexo 6).



Figura 42. Configuración del electrodo.

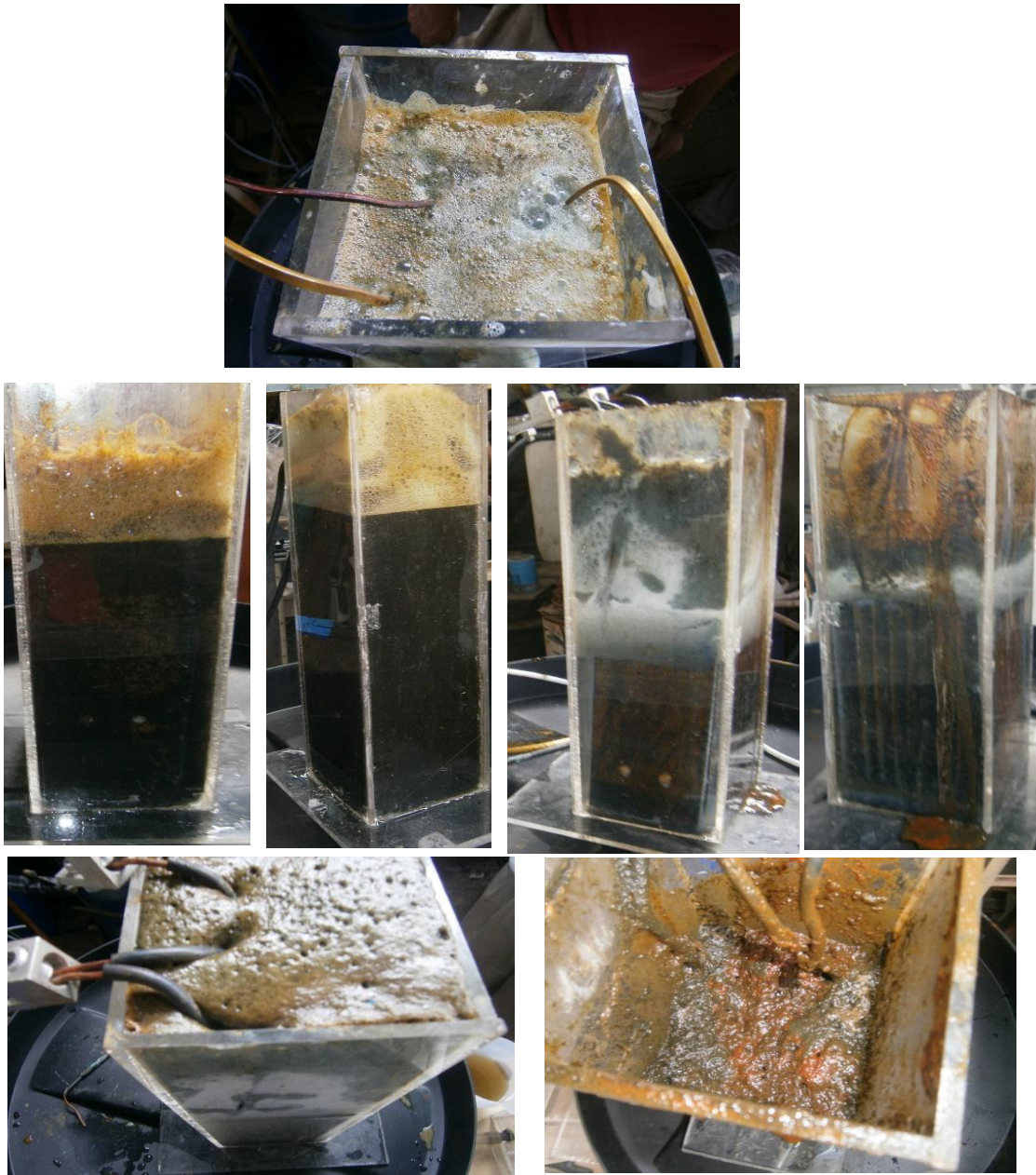
Fuente. Elaboración propia



Figura 43. Regulación de Fuente de poder.

Fuente. Elaboración propia

Etapas durante la reacción de electrocoagulación



*Figura 44. Etapas de la Electrocoagulación.
Fuente. Elaboración propia.*

3.9.2. Operación en la unidad piloto de electrocoagulación y adsorción con carbón activado.

- a. Conectar la fuente de energía.
- b. Colocar los electrodos.
- c. Se enciende la bomba e ingresa el agua residual.
- d. Se enciende la fuente de poder.
- e. Se ajusta el amperaje y el voltaje.

- f. Se acciona el cronómetro para controlar el tiempo de tratamiento.
- g. Estabilizar las variables de operación.
- h. La muestra pasa de la cámara de electrocoagulación a la de sedimentación (Figura 46).
- i. A continuación atraviesa los filtros de carbón activado.
- j. Toma de datos experimentales (Figura 47 - 49).
- k. Al concluir se desconecta el sistema de alimentación hidráulica.
- l. Apagar la fuente de poder.
- m. En estado estacionario se toma una muestra final para análisis del tanque de agua tratada.
- n. Sacar los electrodos para mantenimiento y su posterior limpieza.
- o. Se evacua de las cámaras de electrocoagulación, sedimentación y adsorción el líquido remanente. Se limpia la unidad de electrocoagulación y adsorción.
- p. Se realizan los análisis respectivos .
- q. Se verifica si cumplen con los máximos permisibles para descarga.

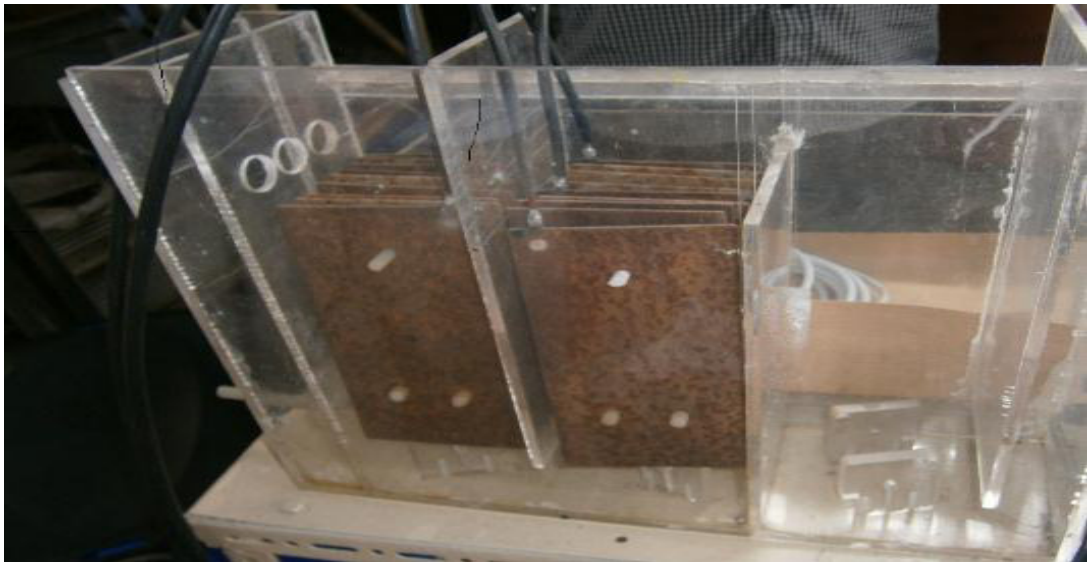


Figura 45. Cámara de electrocoagulación
Fuente. Elaboración propia



Figura 46. Proceso de tratamiento de aguas residuales sintética textil en continuo.

Fuente. Elaboración propia.

3.9.3. Procedimiento para toma de muestras

- a. Colocar la pipeta de 100 ml en la punta de succión del pipeteador. (Figura 47)
- b. Introducir la pipeta en la celda electrolítica.
- c. Suavemente presionar el botón de succión hasta el enrase del menisco.
- d. Una vez tomada la muestra, retirar de la celda la pipeta y se presiona el botón de expulsar para colocar el líquido en la botella de muestra. (Figura 48)
- e. Se procede a analizar los análisis de Color y DQO.
- f. El procedimiento se realiza a los 2 y a los 4 minutos, para las tres corridas respectivamente.



Figura 47. Colocación de la pipeta en el pipeteador.
Fuente. Elaboración propia.



Figura 48. Colocación de líquido en botella de muestra.
Fuente. Elaboración propia.

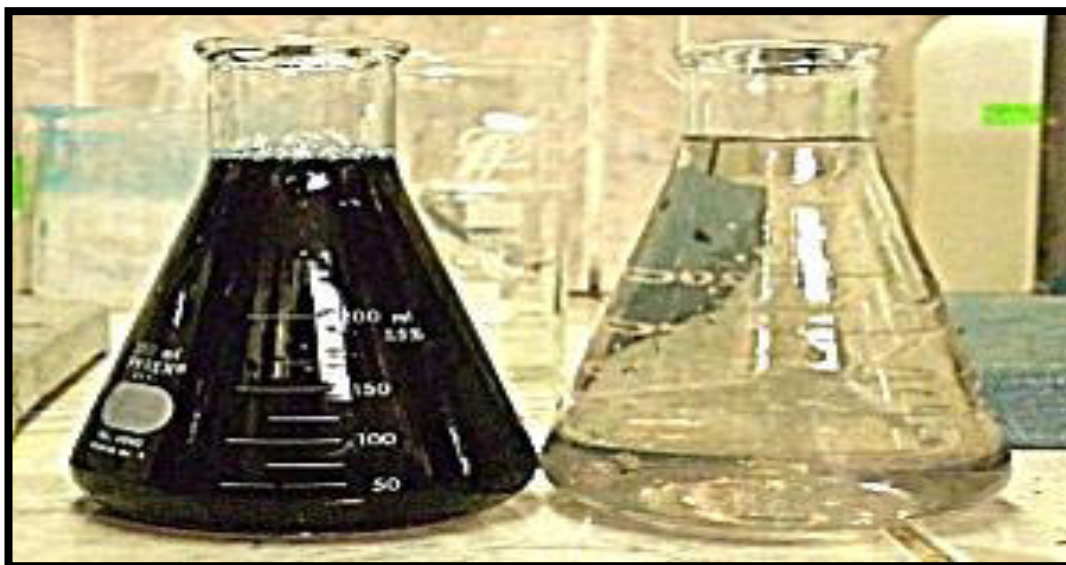


Figura 49. Equipo de Electrocoagulación
Fuente. Elaboración propia

Gráficas de pruebas de laboratorio en el que se observamos el proceso con su respectivo resultado obtenido, Figura 50 y 51.



Figura 50. Muestra de corrida en línea
Fuente. Elaboración propia



*Figura 51: Muestras antes y después del tratamiento.
Fuente. Elaboración propia*

3.10. Pruebas estadísticas

Los resultados se graficaron como medias \pm desviación estándar. Para verificar la normalidad de los datos se aplicó una prueba de Anderson-Darling y para determinar su homocedasticidad la prueba de Levene. Para comparar la media entre tratamientos cuya distribución fue normal se utilizó ANOVA de una vía ($p < 0.05$) y para los no normales una prueba no paramétrica de Kruskal-Wallis ($p < 0.05$). Finalmente, para verificar si existía relación entre las variables se utilizaron gráficos de correlación lineal. Todos los análisis se realizaron con el programa Minitab versión 17.

CAPÍTULO IV: RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Análisis, interpretación y discusión de resultados

4.1.1. Obtención de caracterización de Muestra Sintética

Se caracterizó la muestra de agua residual sintética y se determinó que los parámetros que superan los límites máximos permisibles para descarga a un cuerpo hídrico según el Acuerdo Ministerial 097A fueron DQO, color, DBO, aceites y grasas y los sólidos totales entre otros. (Tabla 8 y Anexo 7).

Tabla 8. Caracterización de muestra sintética.

Parámetros	Análisis	Unidades	LMP para descargas
pH	8.93	-	6-9
DQO	1300	mg/lit	200
DBO	177	mg/lit	100
SST	132	mg/lit	1600
COLOR	3500	PtCo	Inapreciable en dilución 1/20
A y G	37	mg/lit	30
ST	4600	mg/lit	1600
Compuestos Fenólicos	0.031	Fenol	0.031
Sulfatos	780	SO ₄ ⁼²	1000
Tensoactivos	0.78	SAAM	0.5

Fuente. Laboratorio de Aguas. Facultad de Ingeniería Química, Universidad de Guayaquil, 2016.

4.1.2. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.

En la Figura 52A se muestra el efecto de los distintos tratamientos sobre la concentración del color. Se aprecia que hubo una reducción significativa para todos los tratamientos en el tiempo ($p < 0.05$). A partir de los 2 minutos se observan diferencias significativas en la reducción de color entre las intensidades de corriente, siendo la más efectiva la de 15 A donde se redujo de 3500 Pt/Co a 229.00 ± 64.93 Pt/Co ($F = 143.5$; $p = 0.000$). Finalmente, a los 4 min la remoción se dio en el orden $15A > 10A > 5A$ con concentraciones de 31.00 ± 9.84 pt/Co, 138.33 ± 15.94 pt/Co y 369.33 ± 39.10 pt/Co, respectivamente.

El porcentaje de remoción se muestra en la Figura 52B donde se aprecia una disminución de del color de $89,44 \pm 1.12\%$, $96.04 \pm 0.45\%$ y $99.11 \pm 0.28\%$ para 5A, 10A y 15A.

Por otro lado, en la Figura 53A se muestra el efecto de los distintos tratamientos sobre la concentración de DQO. Se aprecia que hubo una reducción significativa para todos los tratamientos en el tiempo ($p < 0,05$). A partir de los 2 minutos se observan diferencias significativas en la reducción de DQO entre las intensidades de corriente, siendo la más efectiva la de 15 A donde se redujo de 1300 mg/L a $60,00 \pm 6,92$ mg/L. Finalmente, a los 4 min la remoción se dio en el orden $15A = 10A > 5A$ con concentraciones de 32.00 ± 6.92 mg/L, 32.00 ± 4.00 mg/L y 69.33 ± 2.30 mg/L, respectivamente.

De igual forma, el porcentaje de disminución de DQO a los 4 min (Figura 53B) fue de $94.66 \pm 0.17\%$, $97.54 \pm 0.30\%$ y $97.53 \pm 0.53\%$ para 5A, 10A y 15A, respectivamente.

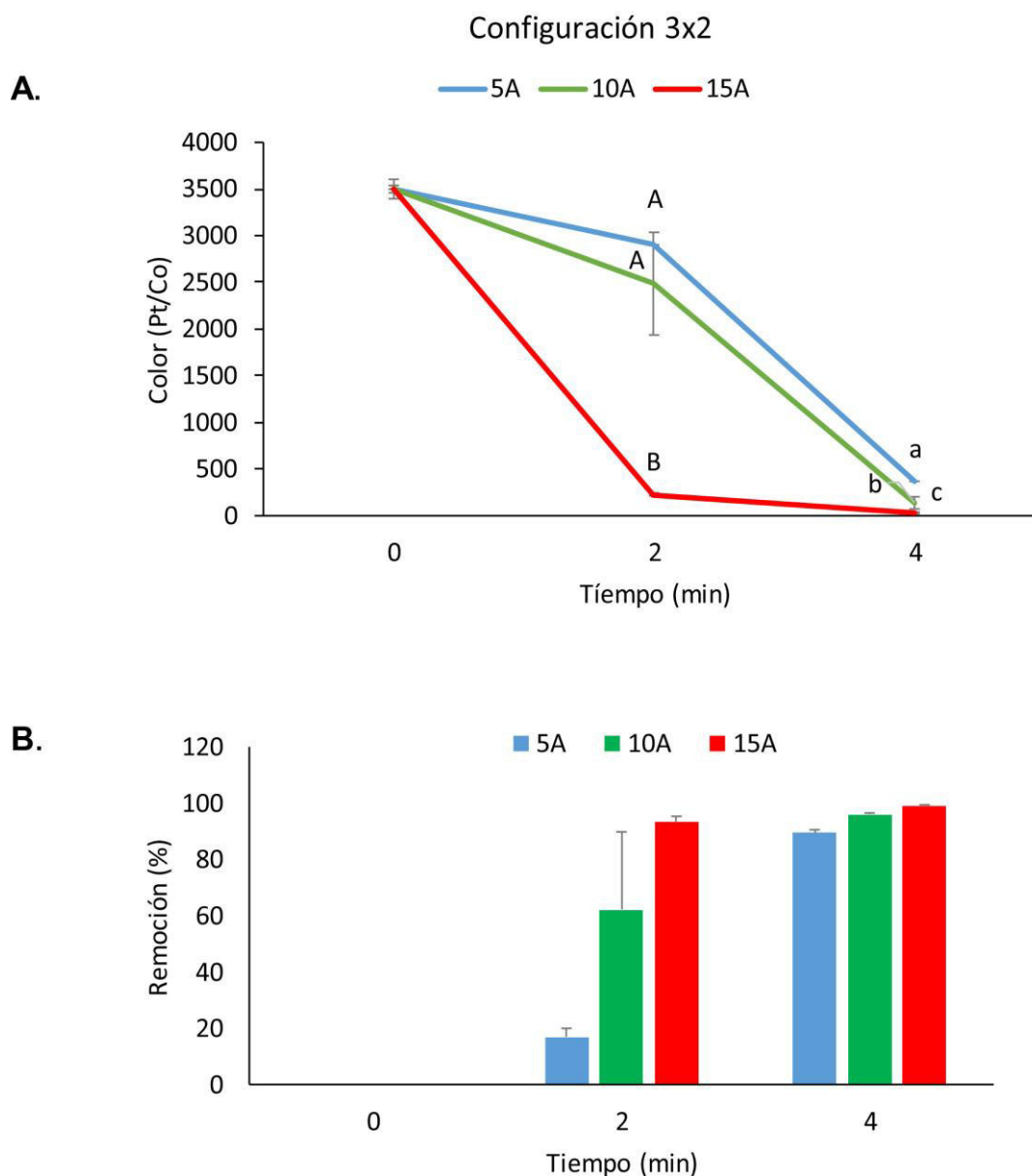


Figura 52. Estadística para 3x2, 0.8 cm en Color.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el color del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x2. Los resultados se muestran como medias±desviación estándar (n=3). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ($p<0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. **B.** Porcentaje de remoción de color.

Fuente. Elaboración propia.

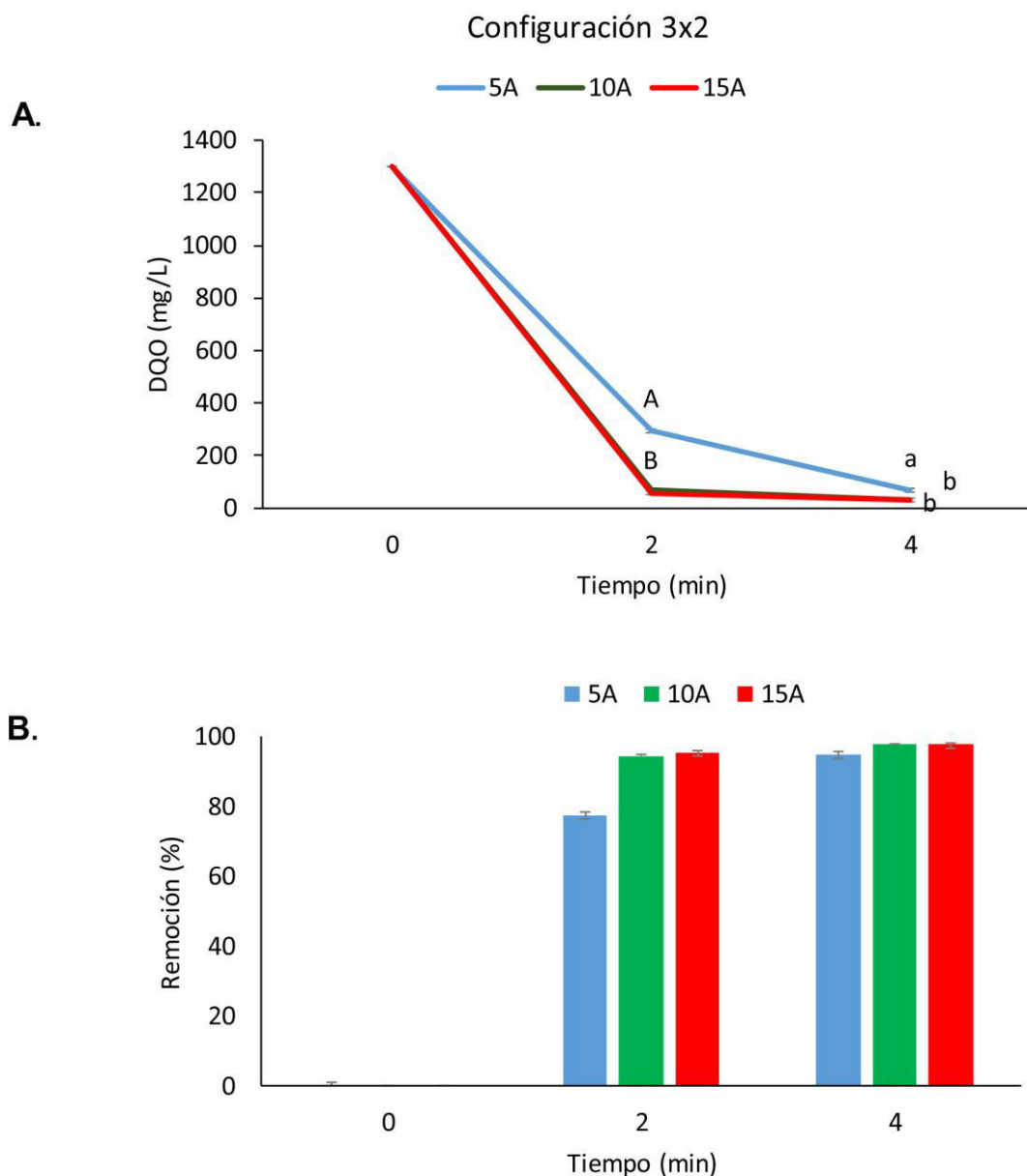


Figura 53. Estadística para 3x2, 0.8 cm en DQO.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el DQO del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x2. Los resultados se muestran como medias \pm desviación estándar ($n=3$). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ($p<0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. **B.** Porcentaje de remoción de DQO.

Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 54 se encuentran los beneficios de la aplicación del tratamiento a 15A :

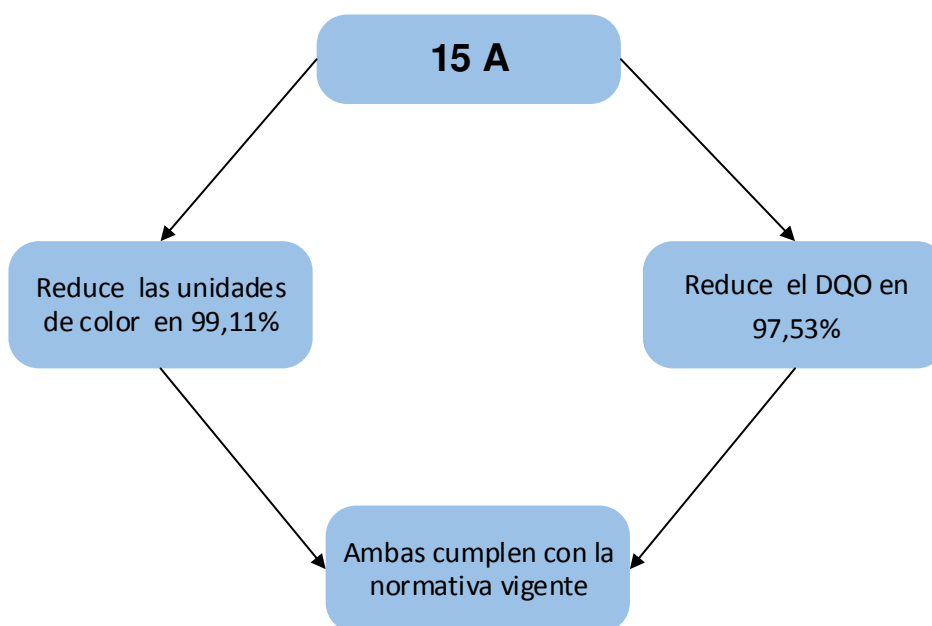


Figura 54. Beneficios de la comparación estadística de configuración 3x2
Fuente. Elaboración propia.

4.1.3. Resultados y análisis estadístico para una configuración de 3 celdas y 3 paquetes con una separación de 0.8 cm.

En la Figura 55 A se muestra la reducción en el color a través del tiempo para el tratamiento de 3x3 donde se aprecia que a 15A se logró una remoción más eficiente a nivel estadístico a partir de los 2 min, con una disminución de 3500 Pt/Co a 18 Pt/Co a los 4 min ($H=10.18$; $p=0.016$), lo que representa un porcentajes de remoción de $96.00 \pm 1.41\%$ (Figura 55B).

En cuanto al DQO, a diferencia del color se apreció una disminución más significativa ($p<0.05$) a 10A a partir de los 2 min, y a los 4 min se redujo de 1300 mg/L a 75.33 ± 11.71 mg/L (Figura 56A), equivalente a $94.20 \pm 0.90 \%$ (Figura 56B).

Después de realizar las pruebas con configuración 3x3 se obtiene comparaciones a través de la herramienta tecnológica Minitab:

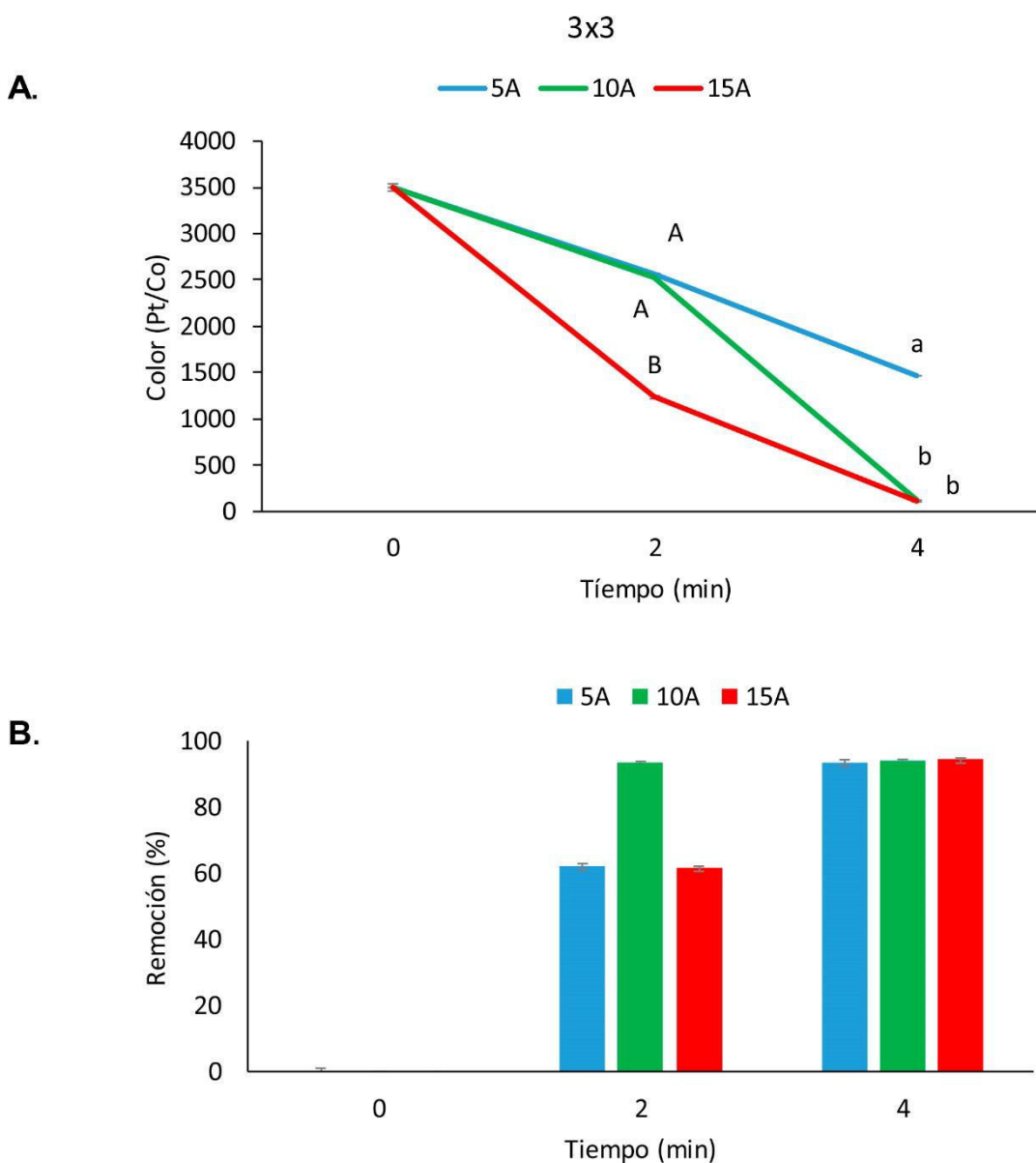


Figura 55. Estadística para 3x3, 0.8 cm en Color.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el color del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x3. Los resultados se muestran como medias \pm desviación estándar ($n=3$). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ($p<0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. **B.** Porcentaje de remoción de color.

Fuente. Elaboración propia.

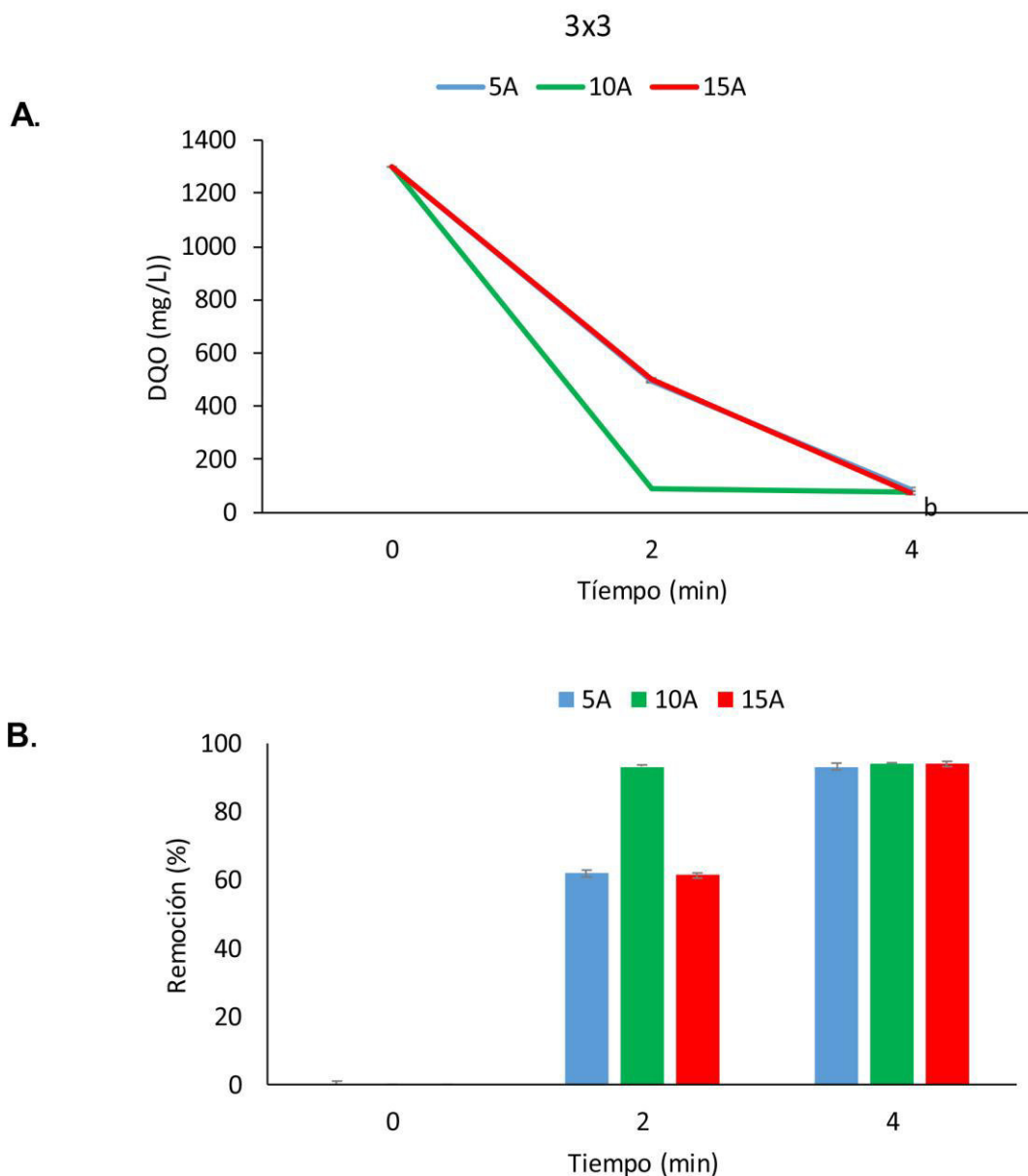


Figura 56. Estadística para 3x3, 0.8 cm en DQO.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el DQO del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 3x3. Los resultados se muestran como medias \pm desviación estándar ($n=3$). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ($p<0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. **B.** Porcentaje de remoción de DQO.

Fuente. Elaboración propia.

4.1.4. Resultados y Análisis de Estadística Configuración de 4 celdas y 2 paquetes con una separación de 0.8 cm.

En la configuración de electrodos de 4x2 de 4 celdas, 2 paquetes, se logra una remoción de color de 3500 Pt/Co a 37.33 ± 6.65 Pt/Co (Figura 57A), lo que representa una reducción del 98.93% a 15A (Figura 57B) con diferencias significativas en comparación a 5A ($p < 0.05$).

Al igual que el color, el DQO se reduce de forma significativa ($p < 0.05$) a partir de los 2 min a 15 A donde se aprecia una disminución de 1300 mg/L a 69.33 ± 2.30 mg/L (Figura 58A) con un porcentaje de remoción de $94.66 \pm 0.17\%$ (Figura 58B).

Después de realizar las pruebas con configuración 3x3 se obtiene comparaciones a través de la herramienta tecnológica Minitab:

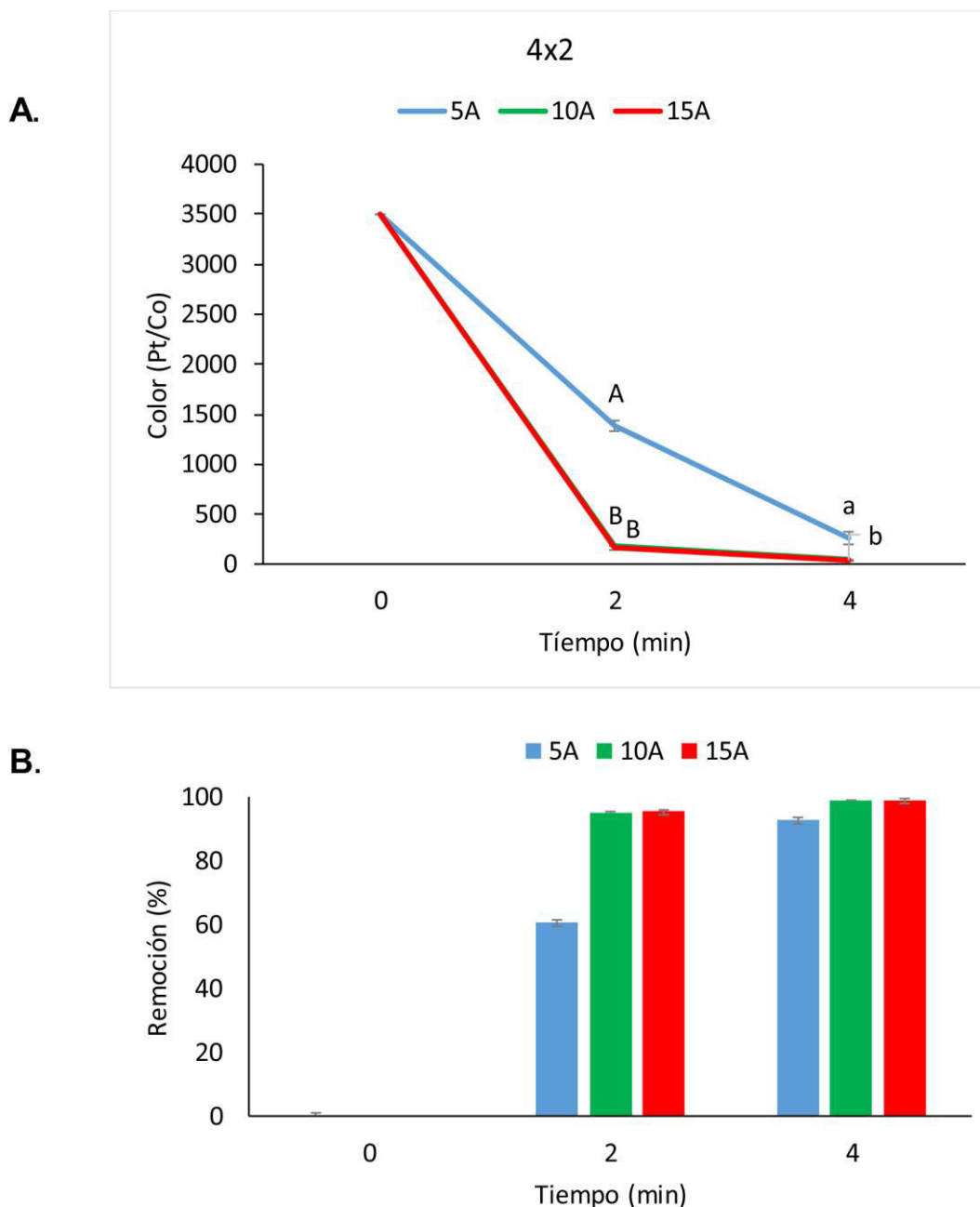


Figura 57. Estadística para 4x2, 0.8 cm en Color.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el color del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 4x2. Los resultados se muestran como medias \pm desviación estándar ($n=3$). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a las 2 min ($p<0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. **B.** Porcentaje de remoción de color.

Fuente. Elaboración propia.

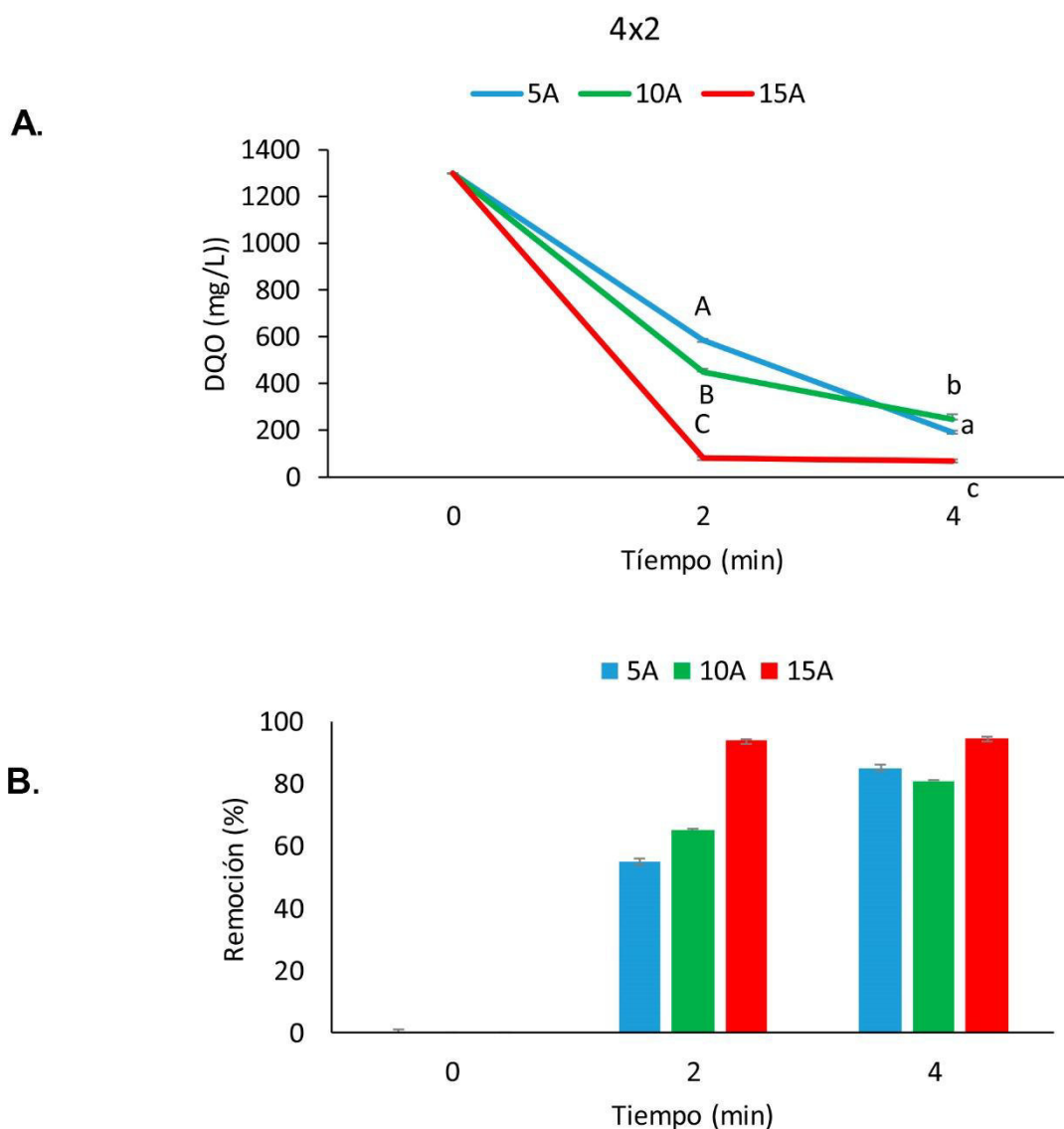


Figura 58. Estadística para 4x2, 0.8 cm en DQO.

A. Efecto de los tratamientos con 5, 10 y 15 amperios sobre el DQO del agua residual sintética de industria textil en el tiempo para la configuración 4x2. Los resultados se muestran como medias \pm desviación estándar ($n=3$). Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min ($p<0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min. **B.** Porcentaje de remoción de DQO.

Fuente. Elaboración propia.

Una vez que se identificó que la mejor intensidad de corriente fue 15 A, se procedió a comparar los porcentajes de remoción entre las distintas configuraciones con la finalidad de determinar cuál era la más eficiente.

En cuanto a la remoción del color 3x2 fue la configuración donde hubo los mayores porcentajes de reducción: $93.45 \pm 1.86\%$ y $99.17 \pm 0.28\%$, a los 2 min y 4 min, respectivamente (Figura 59). Sin embargo, no hubo diferencias estadísticamente significativas con respecto a la configuración 4x2 y la configuración 3x3 fue la menos eficiente con porcentajes de remoción de $64.68 \pm 0.59\%$ a los 2 min y $96.75 \pm 1.42\%$ a los 4 min, significativamente menores a la configuración 3x 2 según Anova de una vía y test a Posteriori de Tukey ($F=646.28$; $p=0.000$).

Por otro lado el DQO se redujo en mayor proporción al igual que el color en la configuración 3x2. Comparativamente a los 2 min de tratamiento hubo un descenso significativo en el DQO de $95.38 \pm 0.53\%$ en la configuración 3x2, seguida por $93.84 \pm 0.30\%$ en 4x2 y $61.50 \pm 0.65\%$ en 3x3 ($F=4096.71$; $p=0.000$). A los 4 min las diferencias entre los porcentajes de remoción entre configuraciones disminuyó, presentando valores semejantes entre las configuraciones 3x3 y 4x2 de $94.20 \pm 0.90\%$ y $94.66 \pm 0.17\%$ y a 3x2 el porcentaje de remoción fue significativamente mayor $97.53 \pm 0.53\%$ ($F=25.92$; $p=0.001$).

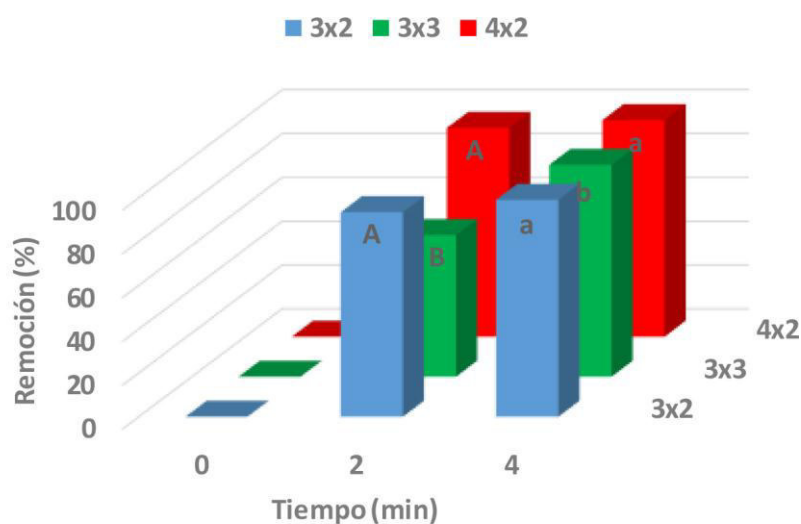
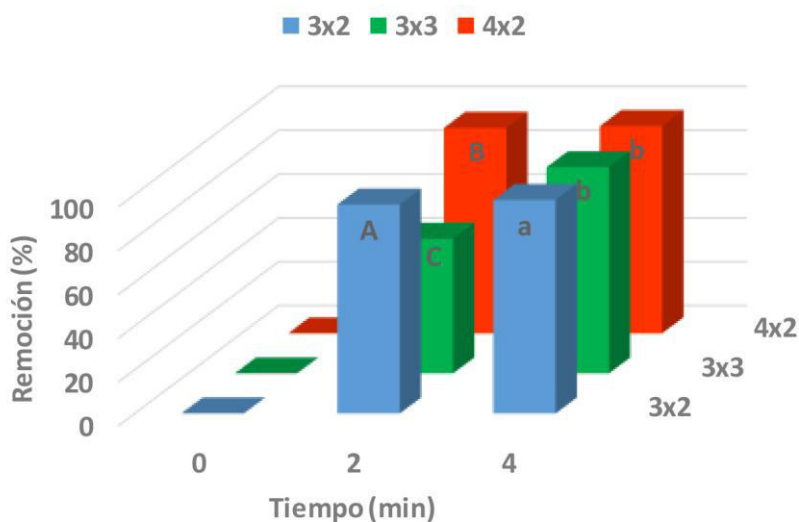
A.**B.**

Figura 59. Comparativa de resultados de remoción.

Comparación entre los porcentajes de remoción a 15A para las distintas configuraciones y tiempos. **A.** Color; **B.** DQO. Letras mayúsculas iguales indican que no hay diferencias significativas entre las medias de los tratamientos a los 2 min según Anova de una vía y test de Tukey ($p < 0.05$). Letras minúsculas iguales indican que no hay diferencias entre las medias a los 4 min.

Fuente. Elaboración propia.

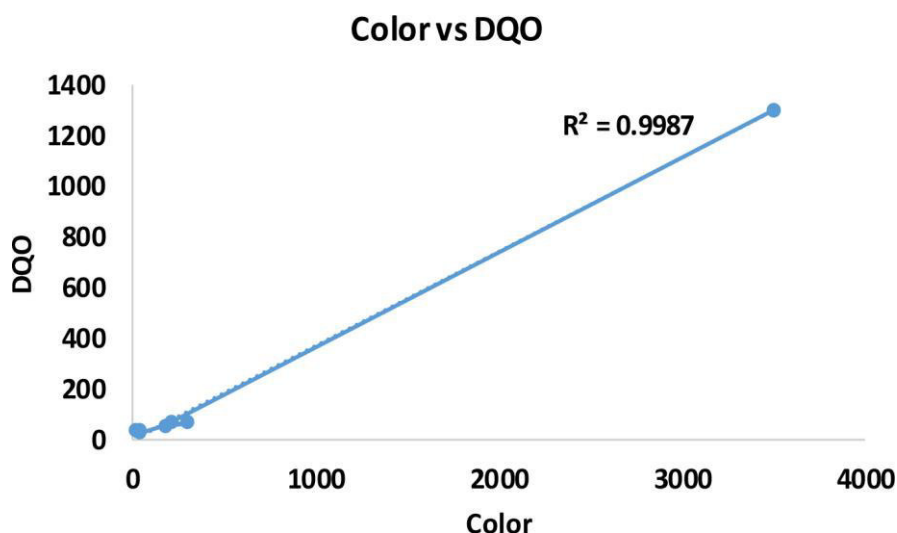


Figura 60. Correlación lineal entre el DQO (mg/L) y el color (Pt/Co).
Fuente. Elaboración propia.

En la Figura 60 se evidenció una correlación lineal $R=0.999$ entre el DQO y el color, por lo que son proporcionales y al disminuir uno de ellos, disminuye el otro.

4.2. Presentación de Resultados

4.2.1. Comparación de los resultados de las pruebas de color y DQO para el tratamiento de electrocoagulación seguido de adsorción

Color

La concentración de color en la prueba de electrocoagulación fue de 31.00 ± 9.84 Pt/Co y al pasar por el proceso de adsorción se redujo a 28.00 ± 2.64 Pt/Co, lo que representa una disminución de 9.6% (Figura 61). Para determinar si las diferencias entre los tratamientos eran significativos, se aplicó un test de Anderson-Darling para determinar la normalidad de los datos. La hipótesis nula de esta prueba es que la distribución de los datos es normal. El valor de p fue de $p=0.944$ por lo que se acepta la hipótesis nula y se comprueba que la distribución de los datos es normal.

Posteriormente se realizó una prueba de Levene para verificar si las varianzas entre los resultados de las pruebas de electrocoagulación y adsorción eran

homocedásticas. El valor de $p=0.252$, por lo que se acepta la hipótesis nula de que la varianza entre los tratamientos era igual. Finalmente se aplicó un análisis de varianzas, ANOVA de una vía ($p<0.05$), cuya hipótesis nula es que la media entre tratamientos es igual. El valor de $F=0.21$ y $p=0.637$ por lo que se acepta la hipótesis nula, lo que significa que no existen diferencias significativas en la concentración final de color entre las pruebas de electrocoagulación y adsorción.

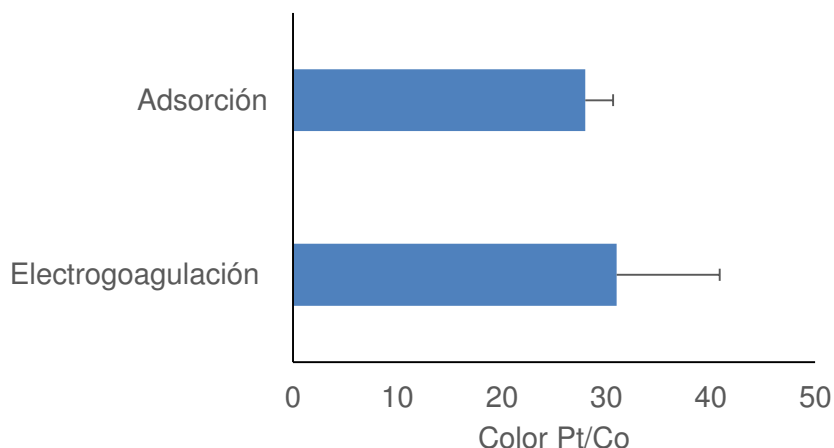


Figura 61. Comparación de la concentración de color con la prueba de electrocoagulación seguida por adsorción.

Complemento Anexo 3.

Fuente. Elaboración propia.

DQO

El DQO en el tratamiento de electrocoagulación mostró una concentración de 32.00 ± 6.52 mg/L y posterior al tratamiento con el carbono activado disminuyó a 26.33 ± 1.53 mg/L (17.71%), sin embargo, las diferencias no fueron significativas (Figura 62). Los datos presentaron una distribución normal según la prueba de Anderson-Darling ($p=0.085$) y fueron homocedásticos según la prueba de Levene ($p=0.499$), por lo que se aplicó un análisis de varianza ANOVA de una vía, donde se evidenció que no existían diferencias significativas entre los tratamientos ($F=1.91$; $p=0.239$).

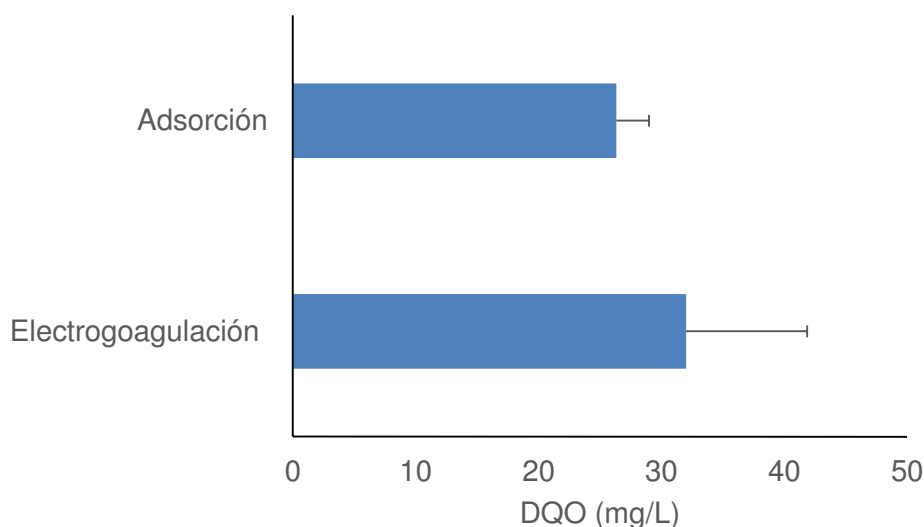


Figura 62. Comparación de la concentración de DQO con la prueba de electrocoagulación seguida por adsorción.

Complemento Anexo 3.

Fuente. Elaboración propia.

4.2.2 Resultados verificación hipótesis principal

Corresponde a un diseño experimental con un grupo, comparado con el valor de referencia de 90%, que es el porcentaje de remoción generalmente aceptado

Ho: el porcentaje de remoción es menor o igual a 90%

H1: el porcentaje de remoción es mayor que 90%

Tabla 9. Verificación de hipótesis principal

One-Sample Test						
	Test Value = 90					
	t	df	Valor p	Mean Difference	95% Confidence Interval of the Difference	
					Lower	Upper
Color	8.611	26	.000	5.57963	4.2477	6.9115
DQO	2.333	26	.028	2.44370	.2903	4.5971

Fuente. Elaboración propia

En la tabla 9, tanto para color, como para DQO, resulta que el % de remoción es mayor que 90%, dado que el valor p es menor que 0.05.

CONCLUSIONES

- La caracterización de las aguas residuales sintéticas con composición similar al efluente de la industria textil, que fue utilizada para esta investigación, fueron las siguientes: pH 8.93, color 3500 unidades Pt/Co, turbiedad 137 NTU, Demanda Química de Oxígeno 1300 mg/l, Demanda Bioquímica de Oxígeno 176 mg/l, sólidos suspendidos totales 132 mg/l, aceites y grasas 10 mg/l, metales como cadmio < 0.02 mg/l, hierro 0.3 mg/l, cromo hexavalente no detectable (N.D).
- La configuración de los electrodos de 3 celdas y 2 paquetes en la técnica de electrocoagulación a 15A fue la más eficiente ya que se logró una mayor desestabilización de las partículas coloidales con una remoción de colorantes refractarios, disminuyendo el color de 3500 a 31 unidades Pt/Co que corresponde al 99.11% de remoción, cumpliendo con la normativa de color estipulada en el Acuerdo Ministerial 097A. de la Norma Ambiental de Ecuador que establece que debe ser Inapreciable en dilución 1/20. Considerando el parámetro DQO, este disminuyó de 1300 a 32 mg/l que equivale a 97.54% de remoción, cumpliendo con los límites máximos permisibles para la descarga a cuerpos hídricos de agua marina que es de 400 mg/l y también cumpliendo con el límite permisible si la descarga es a un receptor de agua dulce donde el límite es de 200 mg/l de acuerdo a la norma de Ecuador.
- Con la aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de realizado el tratamiento con electrocoagulación, disminuyó el color en un 9.6% y el DQO en un 17.71%. Sin embargo estas diferencias no fueron estadísticamente significativas por lo que se concluye que la técnica de electrocoagulación puede utilizarse sin el proceso de carbón activado a posteriori, abaratando los costos del sistema

- Al comparar esta investigación con trabajos de: Kim 2015 y Arango 2011, se observa que estos autores, utilizaron reactores monopolares, obteniendo porcentajes de remoción de color y de DQO más bajos y mayores tiempos de reacción, en este estudio se utilizó reactores bipolares con distintas configuraciones de celdas y paquetes obteniéndose mayores porcentajes de remoción de color y de DQO con tiempos de reacción mucho más cortos, constituyendo este trabajo un aporte por la técnica utilizada en la eliminación de color y del DQO para el tratamiento de aguas residuales de la industria textil.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda aplicar la técnica de electrocoagulación apoyada por otro proceso de oxidación avanzada como ozonización que contribuirá a una mejor eliminación de color y de DQO, pudiendo disminuir el tiempo de reacción.
- Se puede emplear la misma técnica, utilizada en este estudio, con la aplicación de diferentes configuraciones de celdas y paquetes, para la remoción de colorante negro, muy utilizado en la industria textil, el mismo que debido a su composición y concentración es de difícil remoción de los efluentes generados.
- Hacer un estudio de los lodos generados en el proceso de electrocoagulación para su disposición final, o su reutilización como subproducto.
- Dados los excelentes resultados obtenidos a nivel experimental, se recomienda que esta metodología sea aplicada a nivel industrial, en efluentes que descarga la industria textil, lo cual va a contribuir a mejorar la remoción de los contaminantes orgánicos refractarios obteniendo efluentes de calidad para su reutilización o descarta a un cuerpo hídrico o a un sistema de alcantarillado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Álvarez, H. O. (1999). *Propuesta para la prevención y reducción de contaminantes y reducción a las aguas residuales en una planta de teñido de hilo e hilazas*. Medellín: Sena.
- American Water Works Association, A., American Public Works Association, A., & Water Environment Federation, W. (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. Eugene W. Rise; Rodger B. Baird.
- Amezquita, C. (2013). Fundamentos Epistemológicos de la Racionalidad Ambiental, Diálogo de Saberes y Futuro Sustentable. *Revista Crecer Empresarial*.
- Arango. (2007). Diseño de celda de electrocoagulación. *Revista Universidad AEFIT vol 43*, 56-67.
- Arango Ruíz, Á. (2005). La electrocoagulación: una alternativa para el tratamiento de aguas residuales. En *Revista Lasallista de Investigación* (Vol. 2). Redalyc. Obtenido de <http://www.redalyc.org/html/695/69520109/>
- Arango Ruíz, A. (2011). Uso de la electrocoagulación para remoción de tartrazina en soluciones acuosas. *Producción + Limpia*, 6(2), 58- 68.
- Arango-Ruiz, Á. (2014). Tratamiento de aguas residuales mediante electrocoagulación: desarrollo y potencial de aplicación. *Journal of Engineering and Technology*, 3(1). Obtenido de <http://repository.lasallista.edu.co:8080/ojs/index.php/jet/article/view/1132>
- Arbeláez, F. (2005). *Química Inorgánica*. Bogotá Colombia : Santillana .
- Arroyo Núñez, M. G. (2011). *Tratamiento de Disoluciones que Contienen Cromo Hexavalente Mediante Electrocoagulación con ánodos de hierro*. Valencia: Universitat Politècnica de Valencia.
- Barreda-Reyes, K., Ortega-López, J., Ortega-Regules, A. E., Santiago-Santiago, L. A., & Netzahuatl-Muñoz, A. R. (2015). Remoción de Azul brillante de remazol R de soluciones acuosas empleando biomasa de levadura. Tlaxacla.
- Barrera. (2014). *Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales*. MÉXICO: REVERTÉ.
- Boeco Germany. (2017). Boeco Pipette Pumps. Obtenido de http://www.boeco.com/download/BOECO%20Liquid%20Handling%202013_2014.pdf

- Brown, T. L., LeMay, H. E., Bursten, B. E., & Burdge, J. R. (2004). *Química, La Ciencia Central* (Novena ed., Vols. 970-26-0468-0). (P. Educación, Ed.) Naucalpan de Juárez, México: Pearson Educación.
- Butler, E., Hung, Y.-T., Yu-Li Yeh, R., & Suleiman Al Ahmad, M. (2011). Electrocoagulation in Wastewater Treatment. En Mdpi, *Water*. doi:10.3390/w3020495
- Catellar, G., Angulo, E., Zambrano, A., & Charris, D. (Junio de 2013). Equilibrio de Adsorción del Colorante Azul de metileno sobre carbón activado. *UDCA Actualizada & Divulgación Científica*, 16(1), 263 - 271. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-42262013000100030
- Colindres, P. (Diciembre de 2010). Tratamiento de residuales líquidos textiles mediante oxidación con ozono. *Tratamiento de residuales líquidos textiles mediante oxidación con ozono*. Mexico: Centro de investigación en ciencia aplicada y tecnología avanzada.
- Cortazar Martínez, A. (2013). Decoloración del colorante rojo ácido 27 utilizando un cultivo mixto de *Trametes versicolor* y *Pseudomonas putida*, diseñado para el tratamiento de efluentes textiles.
- Cortazar Martínez, A., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, A., & González Ramírez, C. (2013). Contaminación generada por colorantes de la industria textil. *Vida Científica Boletín Científico de la Escuela Preparatoria*, 2(3). doi:2007-4905
- Cortazar Martínez, A., González Ramírez, C., Coronel Olivares, C., Escalante Lozada, J., Castro Rosas, J., & Villagómez Ibarra, J. (2012). Biotecnología aplicada a la degradación de colorantes de la industria textil. *Universidad y Ciencia*, 28(2). doi:0186-2979
- DAMA. (1990). Textiles, planes de acción para el mejoramiento ambiental. *Dama*.
- Damaskín, B. B., & Petri, O. A. (1981). *Fundamentos de la Electroquímica Teórica*. URSS: MIR Moscú.
- Ebbing, D., & Gammon, S. (2009). *Química General* (Novena ed., Vols. 978-607-481-306-7). Mexico: Cengage Learning.
- Enciclopedia Práctica del Estudiante*. (2012). México .
- Gil Pavas, E. (2008). Aplicación de la electroquímica en el tratamiento de aguas residuales. *Cuadernos de Investigación*, 1692-0694. Obtenido de <http://publicaciones.eafit.edu.co/index.php/cuadernos-investigacion/article/download/1279/1158>
- Ibáñez. (2014). *Tecnología de Tratamiento de Aguas*. Santander: Programa Consolider Tragua.

- Kim, H. L. (2015). Treatment and toxicity reduction of textile dyeing wastewater using the electrocoagulation-flotation process. *J Environ Sci Health Hazard Subst ENVIRON ENG*, 661 -668.
- Kirk, R. E., Othmer, D. F., & Scott, J. D. (1962). *Enciclopedia de Tecnología Química* (Vol. Tomo 5). (U. T. Hispano-Americana, Ed.) México: Unión Tipográfica Editorial Hispano-Americana.
- Lavorante, M. J., Álvarez, H., Chantrill, C., & Fasoli, H. (Agosto de 2011). Aplicaciones Ambientales de la Electrocoagulación a escala de Planta Piloto. (F. d. Naturales, Ed.) *Ciencia*, 6(21). Obtenido de <http://www.exactas.unca.edu.ar/revista/v210/pdf/ciencia21-4.pdf>
- Lockuán, F. (2012). *La industria textil y su control de calidad*. V. Tintorería. Obtenido de <https://books.google.com.ec/books?id=6yjBvmYZrTsC&pg=PA91&dq=colorante+reactivo&hl=es&sa=X&ved=0ahUKEwiktbnPqODRAhUDMSYKHS19At0Q6AEIHjAB#v=onepage&q=colorante%20reactivo&f=false>
- López, M. (2007). ¿Qué sostenibilidad?: una lectura desde la Filosofía Práctica. *Biblioteca Nueva Madrid*, 77.
- López-Grimau, V., Amante García, B., & Gutiérrez, M. (2010). Estudio de la viabilidad en de la reutilizacion de banos de tintura textil. *Afinidad LXVI*, 67(547), 182 - 186. doi:0001-9704
- M.Ambiente. (2012). *TULSMA*. Quito: Corporacion de Estudios y Publicaciones.
- Meztanza, M. (2012). Tesis Doctoral. *Estudio de materiales adsorbentes para el tratamiento de aguas contaminadas con colorante*. Madrid.
- Moeller Chávez, G. E. (2000). *Evaluación de diferentes procesos de tratamiento para la remoción de colorante sintético utilizados en la industria textil*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Obtenido de <http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/1406/1/TC-1223.1.pdf>
- Mollah M., Y., Morkovsky, P., Gomes, J., Kesmez, M., Parga, J., & Cocke, D. (2004). *Fundamentals, present and future perspectives of electrocoagulation* (Vol. B114). Journal of Hazardous Materials.
- Mondragón, C. (2005). *Química Inorgánica*. Bogotá: Santillana.
- Osorio Robles, F., Torres Rojo, J. C., & Sánchez Bas, M. (2011). *Tratamiento de aguas para la eliminación de microorganismos y agentes contaminantes.: Aplicación de procesos industriales a la reutilización de aguas residuales*. Ediciones Díaz de Santos.
- Perry, R. (1992). *Manual del Ingeniero Químico* (TOMO II ed., Vols. 968-422-972-0). México: McGraw-Hill.

- Piña–Soberanis, M., Martín–Domínguez, A., González–Ramírez, C., Prieto–García, F., Guevara–Lara, A., & J.E., G.–E. (2011). Revisión de variables de diseño y condiciones de operación en la electrocoagulación. *Revista mexicana de ingeniería química*, 10(2). Obtenido de http://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1665-27382011000200010
- Qayyum, H. (2006). Potential Applications of the oxidoreductive enzymes in the decoloration and detoxification of textile and other synthetic dyes from polluted water. *Critical reviews in Biotechnology*, 26, 201-221.
- Rajeshwar, K., & Ibañez, J. (1997). *Environmental Electrochemistry: Fundamentals and Applications in Pollution Abatement*. San Diego: Academic Press.
- Ramalho, R. (2014). *Tratamiento de aguas residuales*. Espana : Editorial Reverte S.A.
- Ramos, M., Catena, A., & Trujillo, H. (2004). *Manual de métodos y técnicas de investigación en ciencias del comportamiento*. Madrid. Obtenido de <http://www4.ujaen.es/~eramirez/Descargas/tema6>
- Russell, D. L. (2012). *Tratamiento de aguas residuales*. Barcelona : Editorial Reverte.
- Textil, R. A. (2012). colorantes Textiles. *Red textil Argentina*.
- Valenzuela Calahorro, C. (2005). *Adsorción*. Granada. Obtenido de <http://wdb.ugr.es/~academia/discursos/5%20Cristobal%20Valenzuela%20Calahorro.pdf>
- Wang, C., Yediler, A., Linert, D., Wang, Z., & Kettrup, A. (2002). *Toxicity evaluation of reactive dye stuff, auxiliaries and selected effluents in textile finishing industry to luminescent bacteria vibrio fischeri*. Chemosphere.
- Wiley. (2003). *Industrial Dyes: Chemistry, Properties, Applications* (Vols. 3527304266, 9783527304264). (K. Hunger, Ed.) Michigan: Universidad de Michigan.
- Zollinger, H. (1978). *Colour chemistry- Synthesis, Properties of organic dyes and pigments*. New York: VCH Publishers.

ANEXOS

Anexo 1. Matriz de Consistencia

MARTHA BEINERO GARY
Remoción eficiente de colorante refractario azul mmo reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación y adsorción.
Experimental
Tipo de Investigación

Problema de Investigación	Objetivos de la Investigación	Variable	Indicador	Clasificación	Dimensiones	Medición	Tipos de Investigación	Hipótesis	Marco Teórico
Problema General	Objetivo General		pH			4500H Standard métodos		Hipótesis General	
¿Mediante la técnica de electrocoagulación, seguida de adsorción con carbón activado, se puede remover eficientemente el colorante refractario azul mmo reactivo en combinación con vinil sulfónico, de agua residual de la industria textil?	Establecer el nivel de eficiencia de la remoción del colorante refractario mmo reactivo en combinación con vinil sulfónico en aguas residuales mediante técnicas de electrocoagulación, seguida de adsorción.	técnicas de electrocoagulación y adsorción.	densidad corriente tiempo T Capacidad de Adsorción Profundidad de lecho	Independiente	A/m ² min mg/g m	Cronometro 0'-15 min Termómetro 0-100°C Flujómetro 0 -100 cm	Experimental	Mediante las técnicas de electrocoagulación, y adsorción con carbón activado, se mejorará la composición de las aguas residuales provenientes de la industria textil, mediante porcentajes significativos de remoción, reduciendo la contaminación ambiental y el consumo de agua en la ciudad de Guayaquil- Ecuador.	(Barrera, 2014) En su libro "Aplicaciones Electroquímicas al Tratamiento de Aguas Residuales", hace referencia a Panizza,2009, Descky,2010 y Cruz- Gonzales, 2010 sobre las propiedades de los colorantes sintéticos como resistencia a la alaración, la estabilidad fotolítica o la resistencia al ataque químico y biológico, lo que hace que se mantengan inalterables durante largos periodos de tiempo y su presencia en el agua causa fenómenos como eutrofización, baja oxigenación, alteración de color y olor haciéndose persistentes y bioacumulables, todo esto hace que los colorantes no se puedan destruir mediante tratamiento convencional.
Problema Especifico	Objetivo Especifico							Hipótesis Especifica	
¿Cuáles son los parámetros fisicoquímicos del agua residual sintética de la industria textil que alteran la calidad del agua de cuerpos hídricos?	Caracterizar las propiedades físicas químicas del efuyente sintético de industria textil que alteran la calidad del agua de cuerpos hídricos.		DQO		mg/l	5220D Standard Métodos		El pH, DQO, color, SST características del agua residual sintética de industria textil, alteran la calidad del agua de cuerpos hídricos.	M.Pina et al,2011 en la revista Mexicana de Ingeniería Química hace un estudio de las reacciones en los procesos de electrocoagulación en el cual indica que los iones liberados durante la electrocoagulación forman largas cadenas de polí hidróxidos, los cuales son diferentes a los formados en la coagulación convencional cuando se añaden sales químicas, debido a que tienen diferente estructura hidratada. Esta situación permite retirar, retener y desear con mayor facilidad los lodos residuales. Los flocs formados de esta forma son menos hidratados, conteniendo menos agua ligada y por lo tanto se compactan más fácilmente, Martín y col. (2008).
¿Al aplicar técnicas de electrocoagulación los niveles de remoción de los colorantes refractarios se incrementan en la industria textil?	Determinar en qué medida la aplicación de las técnicas de electrocoagulación incrementan los niveles de remoción de los colorantes refractarios y la demanda química de oxígeno en la industria textil.	Remoción eficientemente colorante refractarioen aguas residuales.	Color	Dependiente		8025 HACH	Experimental	La aplicación de la técnica de electrocoagulación incrementa los niveles de remoción de los colorantes refractarios en la industria textil, reduciendo la contaminación ambiental y el consumo de agua en la ciudad de Guayaquil- Ecuador.	La electrocoagulación es un proceso eficiente para desestabilizar finalmente las partículas en agua natural o en la residual, usualmente se utiliza electrodos de aluminio o de hierro y al aplicar la corriente eléctrica los ánodos producen iones de aluminio Al3+ o de hierro Fe2+ estos iones son muy buenos coagulantes y pueden hidrolizarse cerca del ánodo para producir una serie de intermedios activados que son capaces de desestabilizar las partículas dispersas que se hayan presentes en el agua, luego de la desestabilización se produce una aglomeración de partículas formando floculos. En cambio en el catodo se generan pequeñas burbujas de hidrogeno lo que permite que floculo flote facilitando la separación de las partículas del agua residual según lo mencionan.(Chen,2004; Holt, 2004, Canizares,2004).
¿Cómo la aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de la electrocoagulación, permite obtener efluentes con parámetros de calidad para su reutilización o descarga?	Determinar en qué medida la aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de la electrocoagulación, permite obtener efluentes con parámetros de calidad para su reutilización o descarga.							La aplicación de tecnologías de adsorción con carbón activado, luego de la electrocoagulación, permite obtener significativamente efluentes con parámetros de calidad para su reutilización o descarga, reduciendo la contaminación ambiental y el consumo de agua en la ciudad de Guayaquil- Ecuador.	La operación unitaria adsorción se realiza sobre una superficie de un sólido adsorbente mediante la acumulación de una sustancia en una fase líquida o gaseosa (absorbible o adsorbato). Una capa de moléculas de soluto se acumula sobre la superficie del sólido debido al desequilibrio de las fuerzas superficiales. (Ramalho R., 2014).

Anexo 2. Tablas con datos de las corridas que fueron utilizadas en la parte estadística.

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 3 X 2			J = 27.9A/m ²	5A	9V
	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	2	2800	20	300	76.92
	2	2900	16.86	288	77.85
	2	3008	14.06	296	77.23
	4	326	90.69	72	94.46
	4	380	89.14	68	94.77
	4	402	88.51	68	94.77

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 3 X 2			J = 55.8A/m ²	10A	13V
	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	2	1852	47.09	72	94.46
	2	2798	94.03	80	93.85
	2	2810	45.57	68	94.77
	4	146	95.83	28	97.85
	4	149	95.74	36	97.25
	4	120	96.57	32	97.54

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 3 X 2			J = 83.7A/m ²	15A	18V
	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	2	177	94.94	52	96
	2	302	91.37	64	95.08
	2	209	94.03	64	95.08
	4	34	99.03	24	98.15
	4	20	99.43	36	97.23
	4	39	98.89	36	97.23

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 3 X 3			J = 18.60A/m ²	5A	6V
CORRIDA	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	2	2557	26.95	492	62.15
	2	2568	26.63	497	61.74
	2	2593	25.90	497	61.74
	4	1460	58.29	85	93.44
	4	1473	57.90	89	93.13
	4	1465	58.13	89	93.13

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 3 X 3			J = 37.20A/m ²	10A	8V
CORRIDA	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	2	2510	28.29	100	92.31
	2	3010	14.00	80	93.85
	2	2042	41.66	84	93.54
	4	109	96.89	89	93.15
	4	140	96.00	72	94.46
	4	124	96.46	72	94.46

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 3 X 3			J = 55.80A/m ²	15A	16V
CORRIDA	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	0	3500	0	1300	0
	2	1253	64	497	61.74
	2	1227	64.94	494	62
	2	1221	65.11	510	60.76
	4	166	95.25	80	93.84
	4	68	98.05	62	95.23
	4	106	96.97	84	93.53

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 4 X 2			J = 22.32A/m ²	5A	10V
CORRIDA	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	2	1394	60.17	588	54.77
	2	1430	59.14	572	56.00
	2	1327	62.10	596	54.15
	4	271	92.25	195	85.03
	4	318	90.90	180	86.15
	4	193	94.50	203	84.41

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 4 X 2			J = 44.64A/m ²	10A	20V
CORRIDA	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	2	188	94.63	444	65.85
	2	165	95.29	464	64.31
	2	180	94.86	452	65.23
	4	45	98.71	272	79.08
	4	47	98.66	232	82.15
	4	48	98.63	240	81.54

CORRIDAS CON CONFIGURACIÓN 4 X 2			J = 66.96A/m ²	15A	24V
CORRIDA	t(min)	Pt/Co	% Remoción de Color	DQO mg/L	% Remoción DQO
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	0	3500	0.00	1300	0.00
	2	179	94.89	84	93.54
	2	165	95.29	80	93.85
	2	140	96.00	76	94.15
	4	30	99.14	68	94.77
	4	39	98.89	72	94.46
	4	43	98.77	68	94.77

Con la mejor prueba de electrocoagulación 3x2 15 A 18 V

Caracterización inicial y final de agua residual

Tiempo min	Color Pt/Co	% remoción color	DQO mg/l	% remoción
0	3500	0	1300	0
4	31	99.11	32	97.54

Fuente. Elaboración propia.

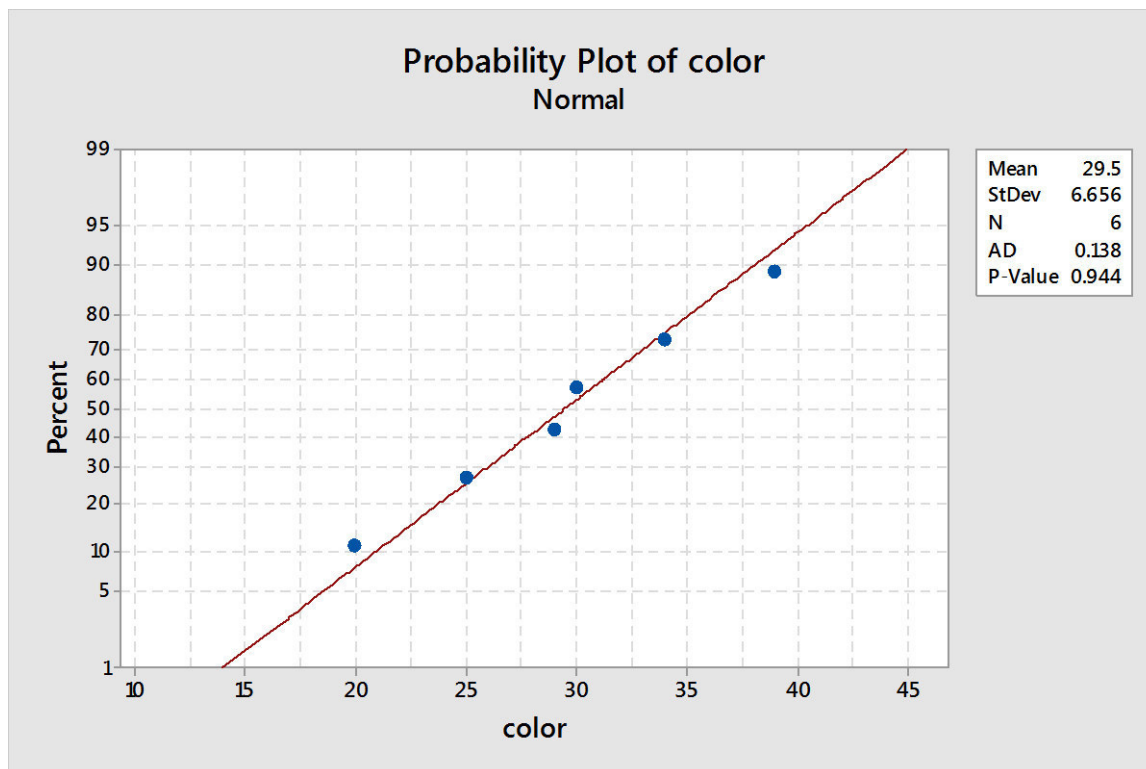
Pruebas con carbón activado luego de la electrocoagulación

Pruebas	Color Pt/Co	% remoción color	DQO mg/l	% remoción DQO
1	29	25.64	28	22.22
2	25	35.89	25	30.55
3	30	23	26	27.78
Promedio	28	28.17	26.33	26.85

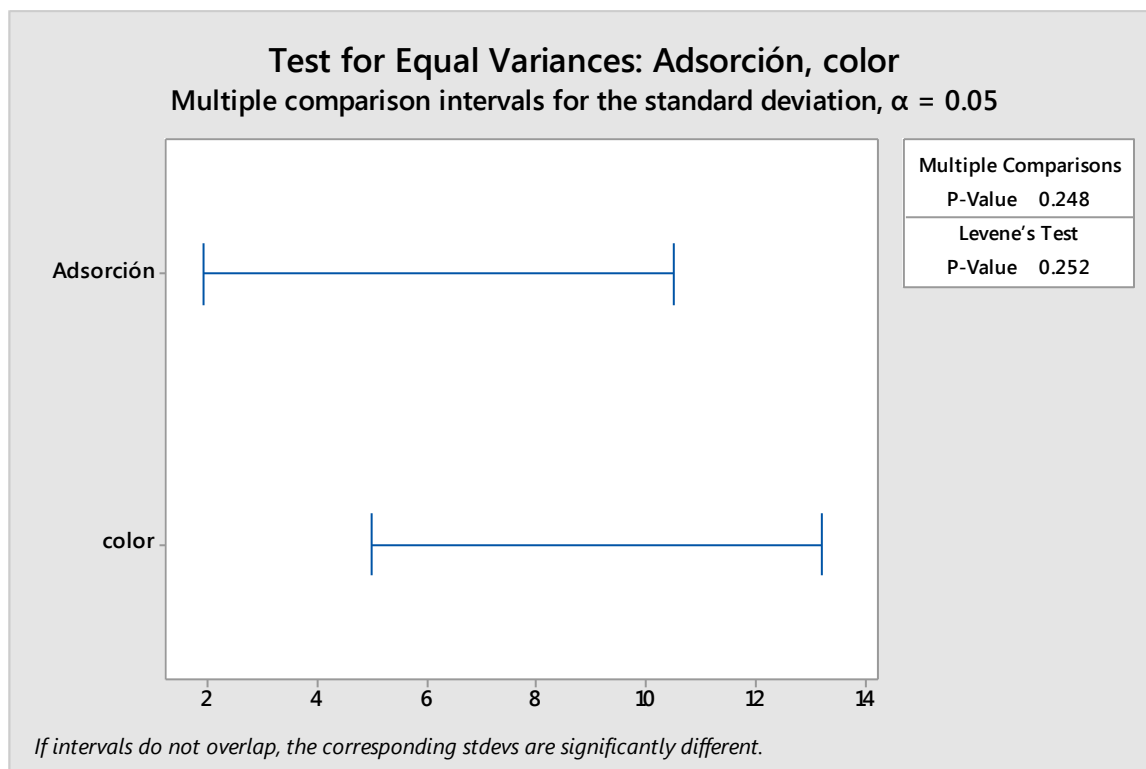
Fuente. Elaboración propia.

Anexo 3. Probabilidad resultante de Comparación de resultados de pruebas de Color y DQO para el tratamiento de electrocoagulación seguido de adsorción.

COLOR



Fuente. Elaboración propia.



Fuente. Elaboración propia.

One-way ANOVA: Electrogoagulación, Adsorción

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Electrogoagulación, Adsorción

Analysis of Variance

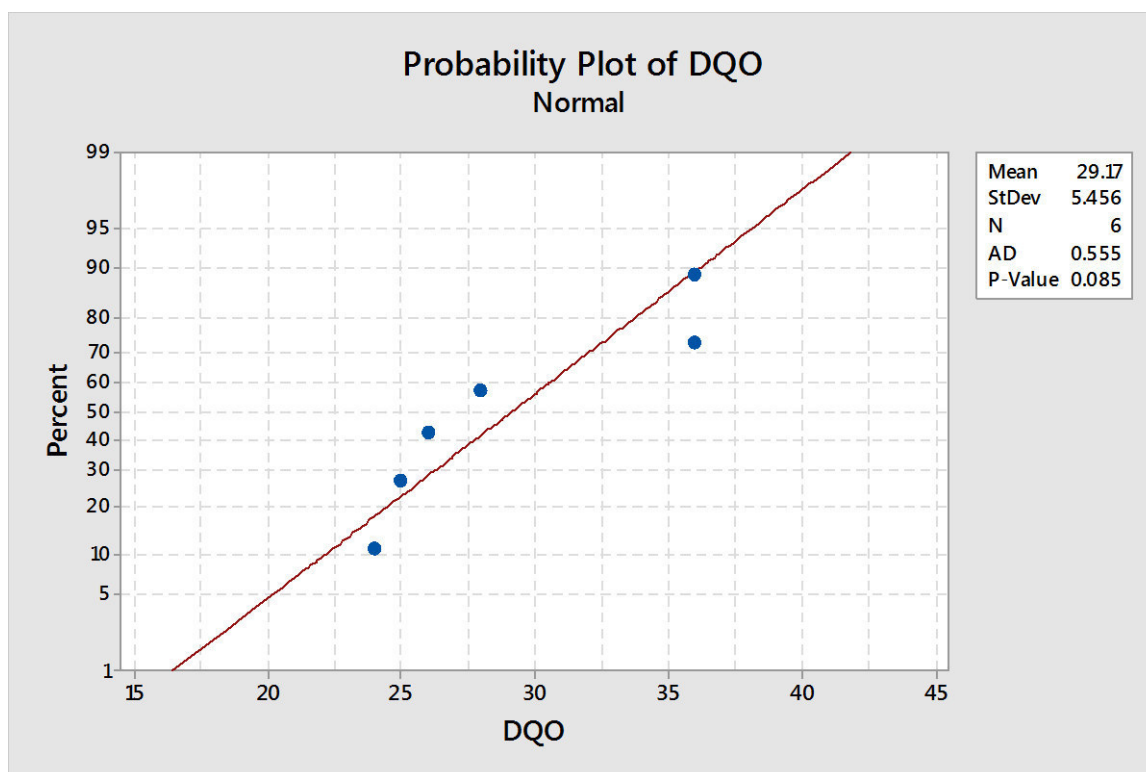
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	13.50	13.50	0.26	0.637
Error	4	208.00	52.00		
Total	5	221.50			

Model Summary

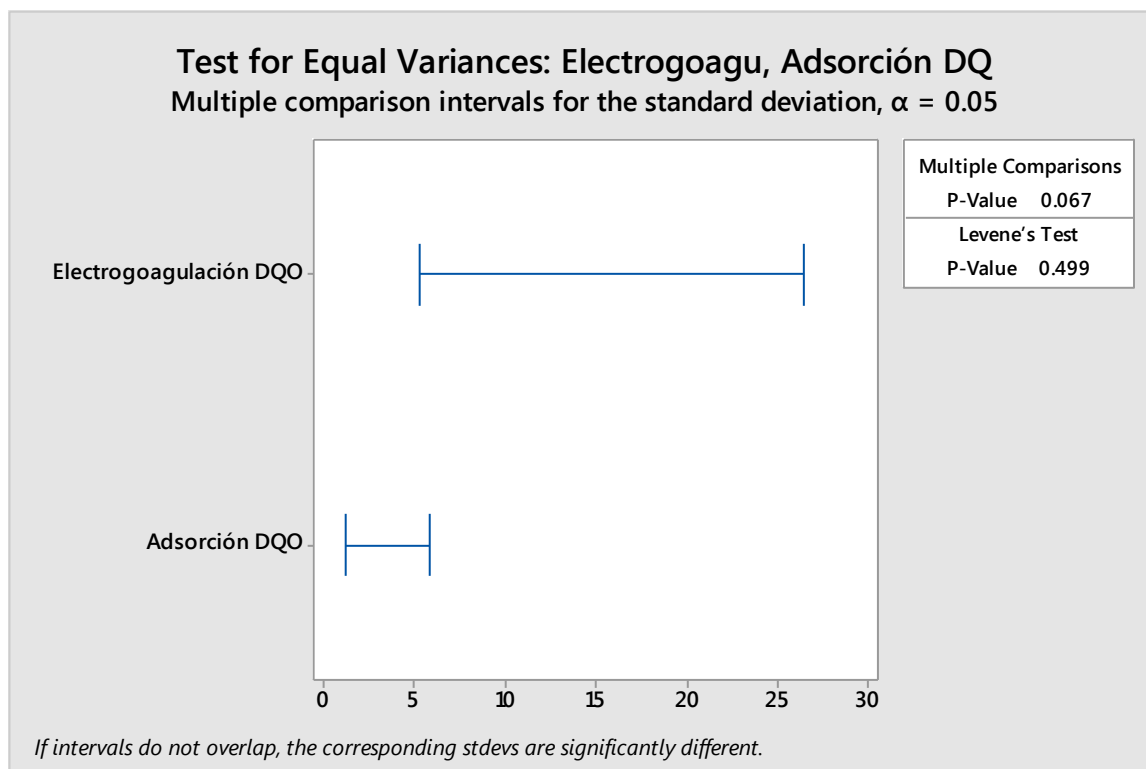
S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
7.21110	6.09%	0.00%	0.00%

Fuente. Elaboración propia.

DQO



Fuente. Elaboración propia.



Fuente. Elaboración propia.

One-way ANOVA: Electrogoagulación DQO, Adsorción DQO

Method

Null hypothesis All means are equal
 Alternative hypothesis At least one mean is different
 Significance level $\alpha = 0.05$

Equal variances were assumed for the analysis.

Factor Information

Factor	Levels	Values
Factor	2	Electrogoagulación DQO, Adsorción DQO

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Factor	1	48.17	48.17	1.91	0.239
Error	4	100.67	25.17		
Total	5	148.83			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
5.01664	32.36%	15.45%	0.00%

Means

Factor	N	Mean	StDev	95% CI
Electrogoagulación DQO	3	32.00	6.93	(23.96, 40.04)
Adsorción DQO	3	26.333	1.528	(18.292, 34.375)

Pooled StDev = 5.01664

Fuente. Elaboración propia.

Anexo 4. Fotos del proceso de electrocoagulación seguido de adsorción.



Figura. 1 Unidad de electrocoagulación y adsorción
Fuente. Elaboración propia.



Figura 2. Vista lateral de la cámara de electrocoagulación
Fuente. Elaboración propia.



Figura 3. Vista superior de la cámara de electrocoagulación
Fuente. Elaboración propia.

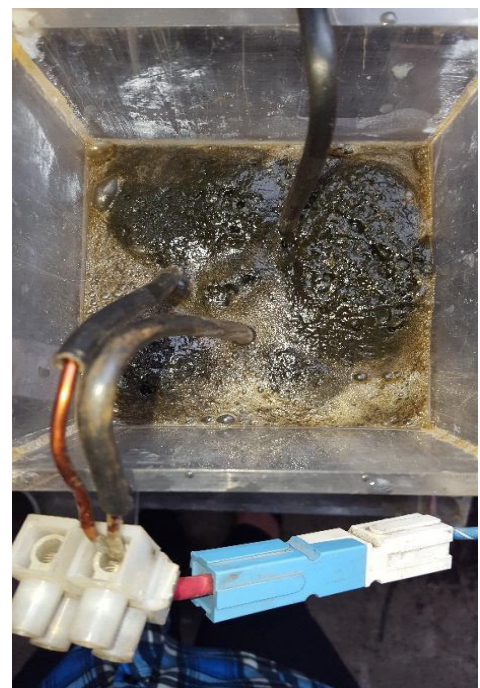


Figura 4. Vista interna y superior de la cuba electrolítica
Fuente. Elaboración propia.



Figura 5. Análisis de color de las muestras procesadas.
Fuente. Elaboración propia.



Figura 6 . Análisis de color de las muestras
Fuente. Elaboración propia.



Figura 7. Análisis de color de las muestras después de adsorción con carbón activado.
Fuente. Elaboración propia.



Figura 8. Análisis de color de las muestras después de adsorción con carbón activado.
Fuente. Elaboración propia.

Anexo 5. Especificaciones del carbón activado granular utilizado.

Para el desarrollo del presente proyecto de titulación, el producto principal a utilizar en el tratamiento de agua residual de industria textil es el carbón activado granular.

HOJA TÉCNICA DEL CARBÓN ACTIVADO DARCO

Marca: Darco 12 X 20

Producido por: NORIT América Inc.

CARACTERÍSTICAS

Darco 12 x 20 es un carbón activado granular lavado con ácido: producido por la activación de vapor a partir de carbón de lignito. Este carbón activado es específicamente manufacturado para aplicaciones que requieren una razón rápida de adsorción en columnas de presión. Es un carbón activado usado en una variedad de aplicaciones incluyendo purificación de refinados químicos y alimentos. DARCO 12 x 20 es utilizado frecuentemente para purificación de agua por su eficiencia alta en la decoloración y capacidad excelente de adsorción para sabor, olor y color. Es auténtico certificado y puede encontrarse en la norma ANSI/NSF Standard 61.

ESPECIFICACIONES DEL PRODUCTO

Eficiencia de decoloración de la maleza	85 min.
Humedad, como paquete, %	12 max.

Tamaño de malla:

Mayor que malla 10 (2 mm), %	3 max.
Mayor que malla 12 (1.7 mm), %	10 max.
Menor que malla 20 (0.85), %	5 max.
Ceniza (polvo), %	0.40 max.

PROPIEDADES TÍPICAS.

Valor de tanino, mg/l	160
Número de yodo, mg/g	600

	137
pH, agua extraída	40
Densidad aparente g/ml	0.37
Lb/ft ³	23
Densidad de cama, retrolavado y drenaje Lb/ft ³	21
Área superficial, m ² /g	650
Volumen total de los poros, mg/l	0.95
Tamaño efectivo, mm	0.7
Diámetro medio de la partícula, mm	1.3
Coeficiente de uniformidad	1.6
Food Chemical Codex	pasa

EMPAQUETADO Y TRANSPORTACIÓN.

El empaquetado estándar es en saco de 40 lb; 30 sacos por “palet”, con una masa de 1200Lb.

Anexo 6. Técnicas de análisis para DQO y Color.

Procedimiento de Análisis de la Demanda Química de Oxígeno (DQO)

Tratamiento de muestras.- Colóquese la muestra en el tubo de cultivo o en la ampolla y añádase la solución de digestión. Viértase con cuidado el ácido sulfúrico en el tubo, de forma que se cree una capa de ácido debajo de la capa de la solución de digestión de la muestra. Apriétese bien el tapón de los tubos o ciérrense bien las ampollas, e inviértase varias veces cada uno de ellos para mezclar completamente.

Se conoce que es crítico el volumen de cada componente y que el volumen total es el mismo para cada recipiente de reacción. Si el control volumétrico es dificultoso, transfiera muestra digestada, diluya a un volumen conocido, y lea. *Reactivos premezclados en tubos de digestión están disponibles comercialmente.*

Se mide un volumen de muestra y reactivos como se indica en la tabla:

Digestión recipientes	Muestra mL	Solución De digestión mL	Reactivo Ácido Sulfúrico ML	Volumen Total Final mL
Tubos				
16x100 mm	2.5	1.5	3.5	7.5
20x150 mm	5.0	3.0	7.0	15.0
25x150 mm	10.0	6.0	14.0	30.0
Ampollas Estándar de 10 mL	2.5	1.5	3.5	7.5

Fuente. Standard Methods para análisis de aguas y aguas residuales industriales y domésticas, 22 ava edición, 2012 (American Water Works Association, American Public Works Association, & Water Environment Federation, 2012).

Una vez medidos los volúmenes tanto de muestras como de reactivos procedemos a tapar el vial, agitarlo a fin de homogenizar su contenido y enjuagarlo con agua destilada, para posteriormente secarlos. Una vez secos colocarlos en el reactor cuando este ya esté en 150°C y programarlo para 2 horas de digestión.

- Medición de la reducción de dicromato.- Enfríe la muestra a temperatura ambiente (la del laboratorio) lentamente para evitar formación de precipitados. Una vez que las muestras son enfriadas, abiertas, si es necesario, para aliviar alguna presión generada durante la digestión. Mezcle el contenido de los recipientes de reacción para combinar agua condensada y materia insoluble desalojada. Dejar que la materia suspendida se asiente y asegure que la trayectoria donde pasa la luz este limpia. Mida la absorción de cada muestra blanco y estándar en una longitud de onda seleccionada (420 nm o 600 nm). En 600 nm, use un blanco no digerido como solución de referencia. Analice un blanco digerido para confirmar el buen estado de los reactivos analíticos y para determinar el blanco de DQO. Reste el DQO del blanco del DQO de la muestra. Alternativamente, use un blanco digerido como solución de referencia una vez que es establecido que el blanco tiene un bajo DQO.
- A 420 nm, use agua grado reactivo (agua destilada) como solución de referencia. Mida todas las muestras, blancos, y estándares contra esta solución. La medición de absorción de un blanco no digerido contiene dicromato, reemplace la muestra con agua de reactivo, dará una absorción inicial de dicromato. Algunas muestras digeridas, blanco, o estándares que tienen un valor de DQO darán baja absorbancia por el decremento en el ion dicromato. Analice un blanco digerido con agua reactiva reemplazando la muestra para asegurar la calidad de los reactivos y para determinar la contribución de los reactivos al decremento en absorbancia durante una digestión dada. La diferencia entre absorbancias de una muestra digerida y un blanco digerido es una medida del DQO de la muestra. Cuando son corridos los

estándares, se trazan diferencias de la absorbancia del blanco digestado y de la absorbancia del estándar digestado versus el valor de la demanda química de oxígeno para cada estándar.

Invierte las muestras frías, blanco y estándares algunas veces antes de medir la absorbancia. Desaloje los sólidos que se adhieren en las paredes del vial golpeando suavemente para que se asienten. Inserte el tubo o la ampolla a través de la punta de acceso dentro del path de luz del espectrofotómetro a 600 nm o a 420 nm. Leer absorbancia y compare para la curva de calibración.

- Preparación de la curva de calibración.- Prepare al menos 5 estándares de phthalato ácido de potasio con DQO equivalentes para cubrir cada rango de concentración (rango menor a rango mayor 900 mg/l). Hacer un blanco con agua destilada use los mismos volúmenes de reactivos y proceda a la digestión. Prepare la curva de calibración para cada nuevo lote de tubos o cuando los estándares preparados difieren mayor o igual al 5% de la curva de calibración. La curva debería de ser lineal. Sin embargo, algunas no linealidades pueden ocurrir, dependiendo del instrumento usado y la global exactitud necesitada.

Procedimiento de Análisis de color

Dependiendo de la instrumentación disponible, puede optarse por uno u otro método. Para mediciones en campo generalmente se opta por un kit de color. La mayoría de estos kits consta de una escala de color plastificada que va desde los 0 hasta 150 unidades de Pt/Co o unidades Hazen, y de un par de celdas para la comparación. El procedimiento consiste en llenar ambas celdas hasta una misma altura, una con la muestra y otra con agua destilada, y en desplazar ambas celdas sobre la escala de color, hasta cuando la coloración de ambas celdas, vistas desde arriba, presenten una misma coloración. Cuando se mide el color mediante un fotómetro, el procedimiento es aún más simple ya que la mayoría de estos equipos traen en sus memorias una serie de “curvas de calibración” que facilitan la medición. Para la mayoría de los casos, el procedimiento se reduce simplemente a la colocación en el equipo,

de una celda fotométrica que contiene un blanco de agua destilada y de otra celda que contiene la muestra. Para eliminar la absorción de luz por parte de las celdas y que dicha absorción altere las medidas, las celdas fotométricas se construyen de un material transparente a la luz con la que se realizan las mediciones. Este material es el cuarzo que, aunque transparente y resistente al rayado, es sumamente frágil al golpe. Por ello es indispensable tener un particular cuidado con las celdas del fotómetro.

Material y equipo:

- Agua desmineralizada, para el lavado de las celdas, antes y después de cada determinación. Estas celdas deben quedar ligeramente húmedas para evitar formación de depósitos en las paredes y, principalmente, en el fondo, ya que esto altera las mediciones.
- Soluciones patrón de cloroplatinato de potasio en la escala de 2 a 200 mg/l, para realizar las curvas de calibración. Se sugieren las siguientes series para muestras con diferente intensidad de color:
 - Soluciones patrón de 2.0; 4.0; 6.0; 8.0 y 10.0 UPC, para muestras de agua dulce poco coloreadas.
 - Soluciones patrón de 5.0; 10.0; 15.0; 20.0 y 25.0 UPC, para muestras medianamente coloreadas.
 - Soluciones patrón de 10.0; 20.0; 30.0; 40.0 y 50.0 UPC, para muestras muy coloreadas.
 - Soluciones patrón de 40.0; 60.0; 80.0; 100.0 y 120.0 UPC, para muestras altamente coloreadas.
- Equipo para filtración al vacío.
- Membranas de filtración de 0.45 μ .
- Tubos Nesler de aproximadamente 15 cm de longitud.
- Frasco lavador.
- Fotómetro capaz de medir a longitudes de onda comprendidas entre 575 y 585 nm.
- Celdas de cuarzo.

Procedimiento

1. Purgue una celda limpia de cuarzo limpia con la muestra.
2. Llene con la celda con la muestra hasta la marquilla.
3. Llene la otra celda de cuarzo con un blanco de agua destilada.
4. Si utiliza un fotómetro, marque el método de análisis y siga los procedimientos indicados en la pantalla del instrumento. Lea y registre el dato

Anexo 7. Resultados de análisis realizados en laboratorio acreditado con la Norma 17025

Informe de análisis de muestra sintética de textilera.

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL	 UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD LABORATORIOS AGUAS PETRÓLEO Y MEDIO AMBIENTE Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil Cda. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292949 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE CON ACREDITACIÓN N° OAE LE C 08-003
---	---	--

INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO

INFORME N°: LA / 186 / 16

SOLICITADO POR:	Ing. Mirella Bermeo, MSc.		
EMPRESA:	-		
DIRECCIÓN:	-		
Fecha de inicio de análisis:	2016 / 11 / 15	Fecha de recepción:	2016 / 11 / 15
Fecha de culminación de análisis:	2016 / 11 / 20		

CIHU: 1730

A: Agua sintética de textilera

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	U (k-2) inact.	Límites Máximos Permisibles ⁽²⁾	Método
			A			
Potencial de Hidrogeno.	pH		8.93	± 0.15	6 - 9	4500-H ¹ B PBB/UCC/LA/02
*Color real	Color real	Pt/Co	3 500	-	Inapreciable en dilución 1/20	8025 HACH
*Turbidez	-	NTU	15.5	-	-	2130 B
*Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O. ₅	mg/l	177	-	200	DBO Trak
**Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	1 300	-	400	520D PBB/UCC/LA/03
**Sólidos suspendidos	-	mg/l	132	-	250	2540 D PBB/UCC/LA/05
**Sólidos totales	-	mg/l	4 600	-	-	2540 B PBB/UCC/LA/07
*Aceites y grasas.	Solubles hexano	mg/l	37	-	30	5520 C
*Compuestos Fenólicos	Fenol	mg/l	0.031	-	0.2	8047 HACH
*Sulfuros	S ⁻²	mg/l	< 0.005	-	0.5	HACH 8131
*Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	880	-	-	HACH 8051
*Tensoactivos	Activos al azul de metileno	mg/l	0.78	-	0.5	HACH 8028

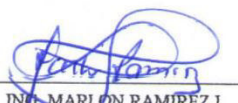
OBSERVACIONES:

Los ensayos marcados () NO están incluidos en el alcance de la Acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano.

**Rango de acreditación: DQO: 100 - 900 mg/l; SST: 100 - 1 000 mg/l; ST: 200 - 2 000 mg/l.

⁽²⁾ Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de agua marina. Acuerdo Ministerial N° 097-A. Noviembre 2015.

(A) Descarga en zona de rompientes.

 ING. MARLON RAMÍREZ L. DIRECTOR TÉCNICO	Fecha de emisión: 2016 / 11 / 21
--	-------------------------------------

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE.

 * Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.
 NOTA: * Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.

Informe de análisis de muestra de agua luego de la electrocoagulación

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL	 UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD LABORATORIOS AGUAS PETRÓLEO Y MEDIO AMBIENTE Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil Cda. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292949 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE CON ACREDITACIÓN N° OAE LE C 08-003
---	---	--

INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO

INFORME N°: LA / 186 / 16

SOLICITADO POR:	Ing. Mirella Bermeo, MSc.
EMPRESA:	-
DIRECCIÓN:	-
Fecha de inicio de análisis:	2016 / 11 / 15
Fecha de culminación de análisis:	2016 / 11 / 20
Fecha de recepción:	2016 / 11 / 15

CIHU: 1730

B: Agua tratada con electrocoagulación

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	U (k=2) inert.	Límites Máximos Permisibles ⁽²⁾	Método
			B			
Potencial de Hidrogeno.	pH		8.78	± 0.15	6 - 9	4500-HB PEE/UCC/LA/02
*Color real	Color real	Pt/Co	31	-	Inapreciable en dilución 1/20	8025 HACH
Turbidez	-	NTU	3.73	-	-	2130 B
*Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O. ₅	mg/l	8	-	200	DBO Trak
**Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	32	-	400	5220D PEE/UCC/LA/03
**Sólidos suspendidos	-	mg/l	10	-	250	2540 D PEE/UCC/LA/05
**Sólidos totales	-	mg/l	3 240	-	-	2540 B PEE/UCC/LA/07
*Aceites y grasas.	Solubles hexano	mg/l	10	-	30	5520 C
*Cadmio	Cd	mg/l	< 0.02	-	0.02	8017 HACH
*Hierro	Fe	mg/l	2.78	-	-	8008 HACH
*Nitrato	Ni	mg/l	0.016	-	-	8150 HACH
*Cromo Hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0.019	-	0.5	8023 HACH
*Compuestos Fenólicos	Fenol	mg/l	0.02	-	0.2	8047 HACH
*Sulfuros	S ⁻²	mg/l	< 0.005	-	0.5	HACH 8131
*Sulfatos	SO ₄ ⁻²	mg/l	63	-	-	HACH 8051
*Tensoactivos	Activos al nivel de metileno	mg/l	0.468	-	0.5	HACH 8028

OBSERVACIONES:

Los ensayos marcados () NO están incluidos en el alcance de la Acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano.

**Rango de acreditación: DQO: 100 - 900 mg/l; SST: 100 - 1 000 mg/l; ST: 200 - 2 000 mg/l.

⁽²⁾ Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de agua marina. Acuerdo Ministerial N° 097-A. Noviembre 2015.

(A) Descarga en zona de rompientes.

 ING. MARLON RAMIREZ L. DIRECTOR TÉCNICO	Fecha de emisión: 2016 / 11 / 21
--	-------------------------------------

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE
EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE.

* Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.
 Nota: * Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.

Informe de análisis de muestra de electrocoagulación seguida de adsorción con carbón activado

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL	 UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD LABORATORIOS AGUAS PETRÓLEO Y MEDIO AMBIENTE Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil Cda. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292949 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL SAE CON ACREDITACIÓN N° OAE LE C 08-003
---	---	--

INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO

INFORME N°: LA / 186 / 16

SOLICITADO POR:	Ing. Mirella Bermeo, MSC.		
EMPRESA:	-		
DIRECCIÓN:	-		
Fecha de inicio de análisis:	2016 / 11 / 15	Fecha de recepción:	2016 / 11 / 15
Fecha de culminación de análisis:	2016 / 11 / 20		

CIHU: 1730

C: Agua después de pasar por electrocoagulación seguido de adsorción

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	U (k-2) incert.	Límites Máximos Permisibles ⁽²⁾	Método
			C			
Potencial de Hidrogeno.	pH		8.98	± 0.15	6 - 9	4500-4f B PEE/UCC/LA/02
*Color real	Color real	Pt/Co	28	-	inapreciable en dilución 1/20	8025 HACH
*Turbidez	-	NTU	1.69	-	-	2130 B
*Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O. ₅	mg/l	2	-	200	DBO Trak
**Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	26	-	400	5220 D PEE/UCC/LA/03
**Sólidos suspendidos	-	mg/l	10	-	250	2540 D PEE/UCC/LA/05
**Sólidos totales	-	mg/l	3 100	-	-	2540 B PEE/UCC/LA/07
*Aceites y grasas.	Solubles hexano	mg/l	3	-	30	5520 C
*Cadmio	Cd	mg/l	< 0.02	-	0.02	8017 HACH
*Hierro	Fe	mg/l	0.02	-	-	8009 HACH
*Níquel	Ni	mg/l	< 0.006	-	-	8150 HACH
*Cromo Hexavalente	Cr ⁶⁺	mg/l	0.012	-	0.5	8023 HACH
*Compuestos Fenólicos	Fenol	mg/l	0.016	-	0.2	8047 HACH
*Sulfuros	S ²⁻	mg/l	< 0.005	-	0.5	HACH 8131
*Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/l	54	-	-	HACH 8051
*Tensoactivos	Activos al azul de metileno	mg/l	0.276	-	0.5	HACH 8028

OBSERVACIONES:

* Los ensayos marcados (*) NO están incluidos en el alcance de la Acreditación del Servicio de Acreditación Ecuatoriano.
 ** Rango de acreditación: DQO: 100 - 900 mg/l; SST: 100 - 1 000 mg/l; ST: 200 - 2 000 mg/l.

⁽²⁾ Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de agua marina. Acuerdo Ministerial N° 097-A. Noviembre 2015.
 (A) Descarga en zona de rompientes.


 ING. MARLON RAMÍREZ L.
 DIRECTOR TÉCNICO

Fecha de emisión:
2016 / 11 / 21

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE
EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE.

* Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.
 Nota: * Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.

Informe de muestra compuesta de agua residual cruda de textilera

 UNIVERSIDAD DE GUAYAQUIL	 UNIDAD DE CONTROL DE CALIDAD LABORATORIOS AGUAS PETRÓLEO Y MEDIO AMBIENTE Facultad de Ingeniería Química Universidad de Guayaquil Cda. Universitaria Salvador Allende Teléfono: 2292949 - FAX: 2294772 Guayaquil - Ecuador	LABORATORIO DE ENSAYO ACREDITADO POR EL OAE CON ACREDITACIÓN Nº OAE LE C 08-003
---	---	--

INFORME DE ANALISIS FISICO - QUIMICO

INFORME Nº: LA / 227 / 15

SOLICITADO POR:	ING. MIRELLA BERMEJO G. MSc.		
EMPRESA:	-		
DIRECCIÓN:	-		
Fecha de inicio de análisis:	2015 / 10 / 28	Fecha de recepción:	2015 / 10 / 28
Fecha de culminación de análisis:	2015 / 11 / 02		

IDENTIFICACIÓN DE LOS ANÁLISIS TABULADOS

A: AGUA RESIDUAL CRUDA DE TEXTILERA.

TIPO DE MUESTRA: COMPUESTA⁽¹⁾

Parámetros	Expresado como	Unidad	Resultados	U (k=2) incent.	Límites Máximos Permisibles ⁽²⁾	Método
			A			
Potencial de Hidrogeno.	pH		9.89	± 0.07	6 - 9	4500-H'B PBE/UCC/LA/02
*Color real	Color real	Pt/Co	3 328	-	Inapreciable en dilución 1/20	8025 HACH
*Turbiedad	-	NTU	85	-	-	SM 2130 B
*Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	D.B.O. ₅	mg/l	356	-	200	2510 B
Demanda Química de Oxígeno	D.Q.O.	mg/l	720	± 65	400	5220 D PBE/UCC/LA/03
**Sólidos suspendidos	-	mg/l	89	-	250	2540 D PBE/UCC/LA/05
**Sólidos totales	-	mg/l	4 270	-	-	2540 B PBE/UCC/LA/07
*Aceites y grasas.	Solubles hexano	mg/l	22	-	30	5520 D
*Compuestos Fenólicos	Fenol	mg/l	0.04	-	0.2	8047 HACH
*Sulfuros	S ²⁻	mg/l	< 0.005	-	0.5	HACH 8131
*Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/l	1 280	-	-	HACH 8051
*Tensoactivos	Activos al nivel de metileno	mg/l	1.98	-	0.5	HACH 8028

OBSERVACIONES:

Los ensayos marcados () NO están incluidos en el alcance de la Acreditación de la OAE.

**Rango de acreditación: SST: 100 - 1 000 mg/l; ST: 200 - 2 000 mg/l.

⁽¹⁾ Dato proporcionado por cliente.⁽²⁾ Legislación Ambiental para descargas a un cuerpo de agua marina. Acuerdo Ministerial N° 028 Sustituye al libro VI. Febrero del 2015.

(A) Descarga en zona de rompientes.

 ING. MARLON RAMIREZ L. DIRECTOR TÉCNICO	Fecha de emisión: 2015 / 11 / 04
---	-------------------------------------

Los análisis fueron realizados de acuerdo al STANDARD METHODS FOR THE
EXAMINATION OF WATER, SEWAGE AND INDUSTRIAL WASTE.

* Los resultados obtenidos en este informe son exclusivos de la Muestra sometida a ensayo.
 Nota: * Queda prohibido la reproducción parcial o total de este informe sin previa autorización de esta Unidad.

Anexo 8. Tablas utilizadas como referencia del Acuerdo Ministerial. 097A del 4 de noviembre del 2015

TABLA 9. LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA DULCE

Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible
Aceites y Grasas.	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,0
Alkil mercurio		mg/l	No detectable
Aluminio	Al	mg/l	5,0
Arsénico total	As	mg/l	0,1
Bario	Ba	mg/l	2,0
Boro Total	B	mg/l	2,0
Cadmio	Cd	mg/l	0,02
Cianuro total	CN ²⁻	mg/l	0,1
Cinc	Zn	mg/l	5,0
Cloro Activo	Cl	mg/l	0,5
Cloroformo	Ext. carbón cloroformo ECC	mg/l	0,1

Cloruros	Cl ⁻	mg/l	1 000
Cobre	Cu	mg/l	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2000
Color real ¹	Color real	unidades de color	Inapreciable en dilución: 1/20
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2
Cromo hexavalente	Cr ⁺⁶	mg/l	0,5
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO ₅	mg/l	100
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/l	200
Estaño	Sn	mg/l	5,0
Fluoruros	F	mg/l	5,0
Fósforo Total	P	mg/l	10,0
Hierro total	Fe	mg/l	10,0
Hidrocarburos Totales de Petróleo	TPH	mg/l	20,0
Manganeso total	Mn	mg/l	2,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,005
Níquel	Ni	mg/l	2,0
Nitrógeno amoniacal	N	mg/l	30,0
Nitrógeno Total Kjeldahl	N	mg/l	50,0
Compuestos Organoclorados	Organoclorados totales	mg/l	0,05
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	mg/l	0,1
Plata	Ag	mg/l	0,1
Plomo	Pb	mg/l	0,2
Potencial de hidrógeno	pH		6-9
Selenio	Se	mg/l	0,1
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/l	130
Sólidos totales	ST	mg/l	1 800
Sulfatos	SO ₄ ²⁻	mg/l	1000
Sulfuros	S ²⁻	mg/l	0,5
Temperatura	°C		Condición natural ± 3
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5
Tetracloruro de carbono	Tetracloruro de carbono	mg/l	1,0

¹ La apreciación del color se estima sobre 10 cm de muestra diluida

TABLA 10. LÍMITES DE DESCARGA A UN CUERPO DE AGUA MARINA				
Parámetros	Expresado como	Unidad	Límite máximo permisible	
			(A) DESCARGAS EN ZONA DE ROMPIENTES	(B) DESCARGAS MEDIANTE EMISARIOS SUBMARINOS
Aceites y Grasas	Sust. solubles en hexano	mg/l	30,0	30,0
Arsénico total	As	mg/l	0,5	0,5
Aluminio	Al	mg/l	5,0	5,0
Cianuro total	CN ⁻	mg/l	0,2	0,2
Cinc	Zn	mg/l	10,0	10,0
Cobre	Cu	mg/l	1,0	1,0
Cobalto	Co	mg/l	0,5	0,5
Coliformes Fecales	NMP	NMP/100 ml	2000	2000
Color	Color verdadero	unidades de color	* Inapreciable en dilución: 1/20	* Inapreciable en dilución: 1/20
Cromo hexavalente	Cr+6	mg/l	0,5	0,5
Compuestos fenólicos	Fenol	mg/l	0,2	0,2
Demanda Bioquímica de Oxígeno (5 días)	DBO5	mg/ l	200, 0	400
Demanda Química de Oxígeno	DQO	mg/ l	400, 0	600
Hidrocarburos Totales de Petróleo.	TPH	mg/l	20, 0	20,0
Materia flotante	Visibles		Ausencia	Ausencia
Mercurio total	Hg	mg/l	0,01	0,01
Nitrógeno Total kjedahl	N	mg/l	40,0	40,0
Potencial de hidrógeno	pH		6-9	6-9
Sólidos Suspendidos Totales	SST	mg/ l	250, 0	250, 0
Sulfuros	S	mg/l	0,5	0,5
Compuestos organoclorados	Organoclorados totales	µg/l	50,0	50,0
Compuestos Organofosforados	Organofosforados totales	µg/l	100, 0	100, 0
Carbamatos	Especies totales	mg/l	0,25	0,25
Temperatura	°C		< 35	< 35
Tensoactivos	Sustancias Activas al azul de metileno	mg/l	0,5	0,5
* La apreciación del color se estima sobre 10 cm de diluida.				

Anexo 9. Cálculo del costo de tratamiento de agua residual textil aplicando electrocoagulación.

1. Cálculos Para obtener la Cantidad de Coagulante Liberado del Electrodo de Hierro.

Ley de Faraday: $N^{\circ} \text{ mol} = Q / n$

$$gFe = \frac{I * t * MA}{n * F}$$

Celdas monopolares:

$$gFe = \frac{I * t * MA * \#celdas}{n * F}$$

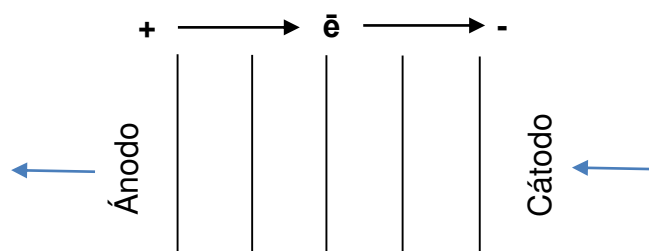
*Celdas bipolares

Donde

Q: carga $Q = I * t$

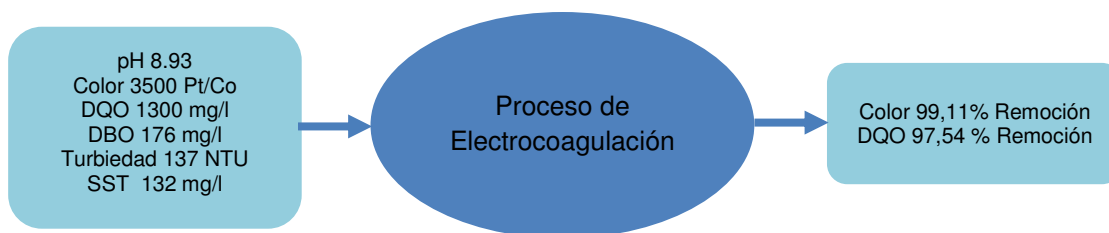
n: número de e^{-} que interactúan

F: número de Faraday $F = 96500 \text{ C}$ $C = A * s$



Reacción anódica: $Fe^0 \rightarrow Fe^{2+} + 2e^{-}$

PROCESO DE REMOCIÓN DE COLORANTE REFRACTARIO AZUL mno REACTIVO EN COMBINACIÓN CON VINIL SULFÓNICO



Proceso de Electrocoagulación de pruebas obtenidas.

Fuente: Elaboración propia

$$gFe = \frac{I * t * MA * \#celdas}{n * F}$$

En lote:

$$gFe = \frac{15A * 240s * 55.85gr/mol * 3celdas}{2 * 96500c}$$

$$gFe = 3.12gr Fe$$

En continuo:

$$Conc. Fe = \frac{3.12grFe}{78lt} = 0,04 gr Fe/lt$$

CONSUMO ENERGÉTICO

$$I = 15 A$$

$$T = 18 v$$

$$P = 270 A$$

$$v = 0.27 kvA = 0.27kw$$

$$\frac{0.27 kw}{78lt} \times \frac{1000lt}{1m^3} = 3.4 kw/m^3$$

DETERMINACIÓN DE COSTO DE AGUA TRATADA / m³

Energía: eléctrica

$$\frac{3.4 kw}{m^3} \times \frac{0.02USD}{1kw} = 0.068 USD/m^3$$

Se consume 3 kw/m³ de agua tratada a un costo de \$ 0,068

Material: electrodos de hierro.

$$3.12 \text{ grFe} \times \frac{0.50 \text{ USD}}{1000 \text{ grFe}} = 0.00156 \text{ USD/m}^3$$

$$COSTOS = ENERGÍA + MATERIAL$$

$$COSTOS = 0.068 \text{ USD/m}^3 + 0.00156 \text{ USD/m}^3$$

$$COSTOS = 0.069 \text{ USD/m}^3$$

2. Cálculo del tiempo de residencia

A Flujo continuo o estado estacionario

$$\text{tiempo residencia} = \frac{\text{volumen}}{\text{caudal}} = \frac{\text{m}^3}{\text{m}^3/\text{hr}} = \text{hr}$$

Tiempo de residencia en el equipo de electrocoagulación

$$tr = \frac{V}{Q} = \frac{12 \text{ l}}{1.3 \text{ l/min}} = 9.2 \text{ min} = 0.15 \text{ hr}$$

Anexo 10. Cálculo del costo de tratamiento de agua residual textil aplicando electrocoagulación a nivel industrial.

CÁLCULO DE LA POTENCIA REQUERIDA.

TENSIÓN = 20 VDC(Voltios Corriente Continua)
 INTENSIDAD= 15 A
 POTENCIA= **300 VA** 0.3 KVA(Kilo Voltios Amperio)

CAUDAL
 PRUEBAS= 80 l/h 1.3333 l/min

ESTIMACIÓN PARA 1.0 m³
 80 l/h 0.3 KVA(Kilo Voltios Amperio)
 1000 l/h KVA

POTENCIA/m³= **3.75 KVA/m³**

ESTIMACIÓN TIEMPO DE TRATAMIENTO

LARGO= 10 cm
 ANCHO= 10 cm
 ALTO= 30 cm
 VOLUMEN= 3000 cm³ **3 litros**

TIEMPO DE TRATAMIENTO EFECTIVO= VOLUMEN OCUPADO POR EL ELECTRODO / CAUDAL DE TRABAJO

$t = V.E./QT$

t*= 4.5 min

***PARA OBTENER ESTE RESULTADO SE CONSIDERA QUE SON DOS ELECTRODOS DE SIMILARES CARÁCTERÍSTICAS**

DIMENSIONAMIENTO DE UNIDADES Y COSTOS

CAUDAL 10 m³/H 0.1667 m³/H
 JORNADA 8 H/día
 VOLUMEN TOTAL 80 m³/día
 Tiempo de Tratamiento 4.5 min

FUENTE DE ENERGÍA

POTENCIA= (GASTO POR METRO CÚBICO) * (CAUDAL)

POTENCIA= 37.5 KVA

COSTO= 24375 USD

ELECTRODOS

VOLUMEN= t * caudal

VOLUMEN= 750 litros ***OCUPADO POR LOS ELECTRODOS**

DIMENSIONES DE LOS ELECTRODOS

PROFUNDIDAD= 100 cm

ANCHO= 40 cm

ALTO= 61 cm

AREA DE LAMINA= 2440 cm²

VOLUMEN POR 244 litros
PAQUETE=

SE REQUIEREN POR LO MENOS TRES PAQUETES PARA CUBRIR EL VOLUMEN TEÓRICO (500 L)

CONFIGURACIÓN Y CARACTERÍSTICAS DEL MATERIAL DEL ELECTRODO

MATERIAL= HIERRO NEGRO

ESPESOR= 1.5 mm 0.15 CM

ANCHO DE LÁMINA= 40 cm

ALTO DE LÁMINA= 61 cm

ESPACIO
INTERLAMINAR= 2 cm

#LÁMINAS/PAQUETE= 46.511628 UNIDADES

PLANCHA DE 244 cm * 122 cm 29768 cm²
HIERRO=

LÁMINAS / PLANCHAS= 12.2 Unidades

TOTAL PLANCHAS= 3.8124285 Unidades

POR CADA CARGA SE USAN CUATRO PLANCHAS DE HIERRO NEGRO DE 1,5 mm, A 2 cm DE SEPARACIÓN

COSTO= 200 USD

COSTO DE 700 USD
ELECTRODOS=

REACTOR

NÚMERO DE

CÁMARAS= # DE PAQUETES DE ELECTRODOS

NÚMERO DE
CÁMARAS= 4
FIBRA DE VIDRIO; ESPESOR DE 0,6
MATERIAL= cm
COSTO= 5750 USD

VARIOS

BOMBAS	2000
ACCESORIOS Y TUBERIAS	1580
AUTOMATISMOS Y	
SENSORES	620
CAJA DE CONTROL Y MANDO	782
CENTRALIZADO	
CABLES Y TERMINALES ELÉCTRICOS DE CONEXIÓN	250
CAPACITACIÓN	
COSTO=	5232 USD

INSTALACIÓN

COSTO= 5408.55 USD

INVERSIÓN FINAL

COSTO TOTAL= 41465.55 USD